

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EFECTO DEL OZONO TROPOSFÉRICO EN LA FISIOLOGÍA DE QUINUA (*POLYLEPIS RETICULATA*) EN EL PARQUE NACIONAL CAJAS”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR:

CHRISTIAN VINICIO ZHUZHINGO PEÑA

C.I. 0104875943

DIRECTOR:

BLGO. JULIO DANILO MEJÍA CORONEL, MSc

C.I. 0103638581

CUENCA – ECUADOR

2017

Resumen

El Parque Nacional Cajas presenta altas concentraciones de ozono troposférico (O_3) con respecto a los niveles del casco urbano de la ciudad de Cuenca, debido a que este es un gas de comportamiento distinto a otros gases contaminantes, este gas tiende a concentrarse en lugares distantes y de gran altura con relación a las fuentes de contaminación. En esta investigación se estudió el efecto del ozono troposférico en la fisiología de *Polylepis reticulata* en el Parque Nacional Cajas, dentro del Parque Nacional Cajas se realizó un análisis estadístico de datos meteorológicos e imágenes satelitales Landsat 7 y 8 de los años 2011, 2012, 2013, y 2014 de la concentración espacial y temporal de este gas, seguido con la validación de los resultados estadísticos de las concentraciones de ozono troposférico con datos obtenidos de los informes de calidad de aire de EMOV EP.

También, se realizó una visualización de enfermedades y un muestreo de las hojas de un individuo de la especie en estudio de cada bosque identificado de *Polylepis reticulata* para realizar un análisis de variables fisiológicas como clorofila *a* y clorofila *b* mediante la técnica de espectrometría

Los resultados fueron analizados con el coeficiente de Pearson (R^2) para determinar su correlación. A la vez, los modelos estadísticos generados sirvieron para la estimación de ozono troposférico a partir de imágenes Landsat 7 y Landsat 8, los análisis espectrométricos arrojaron variaciones significativas con respecto a las variables meteorológicas y una correlación negativa débil respecto al ozono troposférico, las concentraciones de ozono en la clorofila no presentan correlación con las variables fisiológicas estudiadas.

Palabras clave: contaminación atmosférica, bosques, espectrometría, ozono troposférico, sensores remotos, Landsat 7, Landsat 8, *Polylepis*.

Abstract

The Cajas National Park has high concentrations of tropospheric ozone (O₃) with respect to the levels of the urban area of the city of Cuenca, because this is a gas that behaves differently from other polluting gases, this gas tends to concentrate in distant places and of great height in relation to the sources of contamination. In this research, the effect of tropospheric ozone on the physiology of *Polylepis reticulata* in Cajas National Park was studied, within the Cajas National Park a statistical analysis of meteorological data and Landsat 7 and 8 satellite images of the years 2011, 2012, 2013 was carried out. , and 2014 of the spatial and temporal concentration of this gas, followed by the validation of the statistical results of the tropospheric ozone concentrations with data obtained from the EMOV EP air quality reports.

Also, a visualization of diseases and a sampling of the leaves of an individual of the species under study of each identified forest of *Polylepis reticulata* was carried out to perform an analysis of physiological variables such as chlorophyll *a* and chlorophyll *b* by means of the spectrometry technique

The results were analyzed with the Pearson coefficient (R²) to determine its correlation. At the same time, the generated statistical models were used for the estimation of tropospheric ozone from Landsat 7 and Landsat 8 images, the spectrometric analysis showed significant variations with respect to the meteorological variables and a weak negative correlation with respect to tropospheric ozone, the concentrations of ozone in chlorophyll do not correlate with the physiological variables studied.

Key words: Air pollution, forests, spectrometry, tropospheric ozone, remote sensing, Landsat 7, Landsat 8, *Polylepis*.



Contenido

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción.....	11
2. Metodología.....	19
2.1. Área de estudio y puntos de muestreo.	20
2.2. Análisis de muestras y generación de información necesaria para el análisis de resultados.	21
2.3. Información utilizada en la investigación.	23
2.4. Procesamiento y análisis de la información recolectada a través de imágenes satelitales.	27
2.5. Modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de ozono troposférico a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8.	28
2.6. Validación del modelo.	29
2.7. Correlación de resultados.....	29
3. Resultados	31
3.1. Análisis de información <i>in situ</i>	31
3.2. Análisis y validación de los modelos generados.....	34
3.3. Mapa de estimación de concentración de ozono troposférico.	38
3.4. Resultados del análisis espectrométrico.....	39
3.5. Enfermedades observadas en el monitoreo del <i>Polylepis reticulata</i>	41
3.6. Correlación del ozono troposférico con variables meteorológicas y variables fisiológicas del <i>Polylepis reticulata</i>	44
4. Discusiones.....	45
5. Conclusiones	47
5.1. Limitaciones.....	48
5.2. Recomendaciones	48
5.3. Futuras investigaciones	49
Referencias	50
Anexos.....	59



Anexos

Anexo 1. Extracción de clorofila de las hojas de <i>Polylepis reticulata</i>	59
Anexo 2. Extracción completa de la clorofila de <i>Polylepis reticulata</i>	59
Anexo 3. Análisis en el espectrómetro de las muestras	60
Anexo 4. Extracción diaria de la clorofila.....	60
Anexo 5. Secado de las muestras en la incubadora.....	61
Anexo 6. Recolección de muestras en el Parque Nacional Cajas	61
Anexo 7. Parches de bosques característicos de la zona de estudio.....	62
Anexo 8: Coordenadas de los puntos de muestreo.....	63
Anexo 9. Estimación de concentración de ozono troposférico del 28 de julio de 2011 ..	64
Anexo 10. Estimación de concentración de ozono troposférico del 19 de diciembre de 2012.....	64
Anexo 11. Estimación de concentración de ozono troposférico del 4 de mayo de 2013.	65
Anexo 12. Estimación de concentración de ozono troposférico del 30 de octubre de 2014	65
Anexo 13: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2011	66
Anexo 14: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2012.....	66
Anexo 15: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2013.....	66
Anexo 16: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2014.....	67
Anexo 17: Matriz de correlación de bandas Landsat 7	67
Anexo 18: Matriz de correlación de bandas Landsat 8	67
Anexo 19: Presencia de enfermedades en muestras de <i>Polylepis reticulata</i>	68
Anexo 20: Fechas de muestreo	69



Ilustraciones

Ilustración 1. Modelo de Investigación	19
Ilustración 2: Localización de los bosques de <i>Polylepis reticulata</i> y puntos de muestreo	21
Ilustración 3. Puntos de monitoreo de la calidad de aire de la EMOV-EP	24
Ilustración 4. Comportamiento del ozono troposférico durante el periodo 2011-2014 ...	31
Ilustración 5. Aplicación del modelo estadístico de Landsat 8 para la estimación de concentración de ozono troposférico del 20 de noviembre de 2016	39
Ilustración 6. Necrosis presente en <i>Polylepis reticulata</i> de la muestra 9	42
Ilustración 7. Clorosis registrada en la muestra 13	42
Ilustración 8. Pérdida de cobertura foliar de la especie <i>Polylepis reticulata</i> registrada en la muestra 16	43
Ilustración 9. Muerte de individuos de la especie <i>Polylepis reticulata</i> registradas en la muestra 10	43

Tablas

Tabla 1. Características del satélite Landsat 7	16
Tabla 2. Parámetros del satélite Landsat 8.....	17
Tabla 3. Coordenadas (WGS84) de las estaciones de monitoreo de calidad de aire en el Parque Nacional Cajas	24
Tabla 4: Coordenadas (WGS84) de las estaciones meteorológicas utilizadas de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca.....	25
Tabla 5: Variables y unidades de los datos utilizados en esta investigación	26
Tabla 6. Imágenes Landsat 7 y 8 utilizadas en la investigación	27
Tabla 7. Interpretación de los valores del Coeficiente de Pearson	30
Tabla 8. Ubicación de los puntos de muestreo (WGS84) y variables fisiológicas de las especies muestreadas.....	33
Tabla 8. Combinaciones de reflectancias de Landsat 7	34
Tabla 9. Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de las reflectancias de Landsat 7.....	35
Tabla 10. Coeficientes del modelo estadístico de regresión lineal múltiple de Landsat 7.....	35
Tabla 11. Combinaciones de las reflectancias de Landsat 8.....	36
Tabla 12. Análisis estadístico del modelo de regresión lineal para Landsat 8.....	37
Tabla 13. Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple de Landsat 8	37
Tabla 15. Resultados de los análisis espectrométricos realizados a la clorofila de <i>Polylepis reticulata</i>	40
Tabla 16. Resultados de las concentraciones de ozono en la clorofila y clorofila total por mg de peso seco.	41
Tabla 17: Coeficiente de Pearson del ozono troposférico con variables meteorológicas y variables fisiológicas de la especie <i>Polylepis reticulata</i>	44



Cláusula de Propiedad Intelectual

Christian Vinicio Zhuzhingo Peña, autor del trabajo de titulación “Efecto del ozono troposférico en la fisiología de quinua (*Polylepis reticulata*) en el Parque Nacional Cajas”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de diciembre de 2017.

Christian Vinicio Zhuzhingo Peña

C.I: 0104875943



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Christian Vinicio Zhuzhingo Peña en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Efecto del ozono troposférico en la fisiología de quinua (*Polylepis reticulata*) en el Parque Nacional Cajas”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de diciembre de 2017.

Christian Vinicio Zhuzhingo Peña

C.I: 0104875943



Agradecimiento

A Dios por haberme guiado por el buen camino del éxito y la felicidad; a cada uno de mis amigos y familiares que me apoyaron durante la realización de esta tesis, a mi PADRE Manuel Zhuzhingo, mi MADRE Carmen Peña; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Agradezco también a mi director de tesis, el Blgo. Danilo Mejía por haberme brindado la oportunidad de compartir conmigo su conocimiento científico, así también por haberme tenido paciencia en cada momento del desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Geovanny Larriva por haber aceptado a que realice los análisis en el Laboratorio de Aguas de la Universidad de Cuenca y por guiarme en los análisis espectrométricos.

Y para finalizar, también agradezco a todos mis profesores, amigos y compañeros de la universidad, ya que gracias al ejemplo, compañerismo, sinceridad y apoyo han aportado a forjar mi carrera profesional.

1. Introducción

Los países del mundo ven con preocupación el aumento de la contaminación ambiental, que a futuro causará en la población mundial caídas económicas y catástrofes naturales con mayor frecuencia, el cambio climático provocado por los cambios bruscos en la composición gaseosa atmosférica ha hecho que fenómenos atmosféricos sean más recurrentes, cuyos efectos generalmente afectan las actividades humanas (Altieri y Nicholls, 2009).

Durante el último siglo las actividades humanas han inducido un aumento de la contaminación atmosférica, debido al incremento de industrias, quema de combustibles y deforestación, induciendo a una mayor emisión de gases contaminantes como azufre, metano, óxidos de carbono, etc. Este incremento de gases contaminantes, seguido a otros factores como la sobrepoblación han hecho que la capacidad de carga del planeta llegue a su límite, dando como resultado problemas en la distribución de recursos y de contaminación ambiental (Mendoza y Garbarino, 2016).

En lo que al ozono troposférico se refiere, la literatura lo cataloga como un contaminante de gran accionar sobre el ser humano y el ecosistema, en el ser humano es causante de enfermedades que afectan el sistema respiratorio entre las cuales se pueden mencionar daños a los alveolos pulmonares, agravación de padecimientos en los pulmones así como un aumento en la susceptibilidad a infecciones en este órgano (Fann et al., 2014).

Dentro del ecosistema, los efectos de este gas ocurren en plantas vasculares y se reflejan en alteraciones estomáticas, reducción de los pigmentos fotosintéticos y reducción del crecimiento y producción de biomasa (Wu et al., 2015).

Opuesto a los patrones de distribución y acumulación de los demás gases denominados de efecto invernadero, las mayores concentraciones de ozono se encuentran en zonas de la periferia de las ciudades, especialmente en lugares con elevadas exposiciones a radiación ultravioleta (Lacasaña y Aguilar, 1999).

El ozono en la tropósfera es considerado un gas de efecto invernadero encontrándose en dos escenarios atmosféricos distintos. Por un lado, forma la capa estratosférica planetaria, la cual en los últimos años se ha reducido notablemente por el descongelamiento de hielo y disminución del albedo terrestre, principalmente en los polos cuyos registros evidencian una pérdida record de ozono estratosférico en el Ártico durante la primavera de 2011 (López, Montero, Atanasio, y Cansado, 2011) . Por otro lado, es un contaminante producido principalmente en las ciudades industrializadas; está concentrado en los niveles bajos de la atmósfera y es por esta razón que se llama ozono troposférico. Al haber más

ozono troposférico, la radiación terrestre queda atrapada en la atmósfera y calienta el clima (Garduño, 2004).

El ozono (O_3) es uno de los contaminantes atmosféricos más fitotóxicos, causando graves daños a la vegetación, disminuyendo la fotosíntesis neta, aumentando la senescencia prematura y disminución en el rendimiento de cultivos (Sanz González, 2017). En algunos casos se presenta fisiopatía en las hojas de la planta, provocando necrosis general de las hojas y en casos extremos pérdidas de plantas (Gamarra y Elis, 2016).

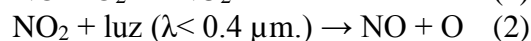
Algunas investigaciones afirman que este efecto se debe a que el ozono penetra por los estomas necrosando el tejido adyacente y puede influir en el metabolismo celular, pero también puede estar relacionado con el tiempo en que los estomas permanecen abiertos por las condiciones ambientales y otros elementos físicos como cambios en variables meteorológicas (Rodríguez, Santana, Padrón, y Gómez, 2015).

El ozono troposférico no es emitido directamente hacia la tropósfera, principalmente este es originado a través de las áreas urbanas por varias fuentes de emisión, entre las que podemos incluir las producidas por automóviles y las industrias, es por esto que las mayores concentraciones se dan durante el día y con alta radiación solar (IDEAM, 2017). El ozono troposférico está formado a partir de reacciones fotoquímicas complejas y radiación UV, por lo que es considerado un contaminante secundario.

La formación de radicales libres se produce a través de la radiación cercana al ultravioleta, producto de la cual existe una disociación de las moléculas estables de contaminantes primarios como los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO , NO_2), la generación de los óxidos de nitrógeno se da en la quema de combustibles, principalmente la generada por fuentes móviles. Por lo general la formación de ozono se da bajo condiciones de estabilidad atmosférica, con presencia de humedad, luz solar y contaminantes presentes en la atmósfera, por lo que contaminantes primarios como el monóxido de nitrógeno, hidrocarburos no metálicos o el metano reaccionan para generar NO_2 y O_3 , los cuales son contaminantes secundarios.

El monitoreo de las condiciones atmosféricas en cuanto a ozono troposférico han determinado que las mayores concentraciones de ozono medidas se presentan durante el mediodía, como consecuencia de la mayor intensidad de la radiación (Kirchner, 2009). La radiación estimula la fragmentación de moléculas de gases generando las reacciones presentadas en las ecuaciones (1), (2) y (3), en la cual el monóxido de nitrógeno se oxida y forma dióxido de nitrógeno, éste entra en contacto con la radiación con longitudes de onda menores a 400nm dando como producto monóxido de nitrógeno y la liberación de

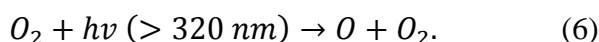
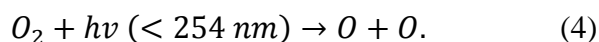
oxígeno, el oxígeno libre reacciona con las moléculas de oxígeno presentes en la atmósfera para formar ozono.



El óxido nítrico actúa como contaminante primario, emitido por entornos industriales, urbanos u otras fuentes, generando dióxido de nitrógeno que es descompuesto foto químicamente originando oxígeno atómico y en combinación con el oxígeno molecular se forma ozono (Velásquez y Jiménez, 2017).

Gases como el metano (CH_4), monóxido de nitrógeno (NO) y el monóxido de carbono (CO) son causantes de que la molécula de ozono se disocie en lugares donde existe una mayor concentración de estos gases, por lo que su presencia en el centro de emisión de gases primarios suele ser de menor concentración que en las periferias de las ciudades y zonas rurales (Espejo y Gutiérrez, 2013).

Todas estas reacciones pueden resumirse en las denominadas ecuaciones de Chapman (Luque Jiménez, 2004), en las cuales tanto (4) y (5) representan la formación de ozono, (6) y (7) la destrucción de ozono:



Estos rangos de exposición ultravioleta permiten determinar y cuantificar el ozono presente en una muestra, utilizando un método bastante popular dentro del área de la investigación como lo es la espectrometría (Sosa, 2010).

La espectrometría es la medida de la cantidad de energía radiante absorbida por las moléculas de una muestra en función de longitudes de onda específicas, con esta metodología es posible cuantificar la concentración de un compuesto o solución (Faraldos y Goberna, 2011).

Es una técnica analítica que se basa en la absorción de las moléculas de las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende linealmente de la concentración de las sustancias o moléculas, para este tipo de mediciones el instrumento a utilizar es el espectrómetro, en el cual se puede seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida (Monge, 2015).

En una investigación desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Llumiyinga y Cristina, 2008) demuestran la posibilidad de la cuantificación de ozono en muestras líquidas y que es factible determinar concentraciones de ozono utilizando imágenes satelitales mediante modelos estadísticos, por lo que la teledetección y la espectrometría se convierten en metodologías válidas para determinar efectos de gases en diferentes especies.

Para determinar los efectos de alteraciones atmosféricas es recomendable realizar investigaciones dentro de Reservas Naturales (Amend, 1995), debido al monitoreo de variables meteorológicas que registran. Una Reserva Natural muy importante es el Parque Nacional Cajas, que además fue declarada como Reserva de Biósfera por la UNESCO en 2014 (Mora y Serrano, 2017).

El Parque Nacional Cajas está ubicado en la parte centro sur del país, en la provincia del Azuay, cantón Cuenca, posee un rango altitudinal desde los 3.152 m.s.n.m. a 4.445 m.s.n.m., la topografía del parque se encuentra formado por grandes elevaciones, dentro de las cuales se puede encontrar numerosos sistemas lacustres interconectados, allí la temperatura puede variar entre los -2 a 18°C.

214 especies conforman la fauna del Parque Nacional Cajas, de las cuales 152 son de aves, 15 de anfibios, 4 de reptiles y 43 de mamíferos. En cuanto a la flora se pueden encontrar alrededor de 16 especies de plantas vasculares. Además, dentro de esta reserva de la biosfera se puede encontrar 71 especies de flora y fauna endémicas del Ecuador, por lo que es considerado un sitio de endemismo vegetal y animal (Ministerio del Ambiente, 2017).

En los páramos, los parches de bosque incrementan la precipitación, regulan los caudales de los ríos al interceptar el agua en la vegetación, para luego dejarla filtrar en el suelo (Zutta et al., 2012). También la cobertura boscosa protege al suelo de la erosión, retienen sedimentos, nutrientes y fijan carbono. La presencia de *Polylepis reticulata* en los bosques reduce la radiación nocturna manteniendo el interior de los bosques más cálido y libre de heladas (Jara y Torres, 2016).

Dentro de toda la flora presente en el Parque Nacional Cajas está el árbol de *Polylepis reticulata*, el cual es de gran importancia, debido a que cumple varias funciones ecológicas como refugio y alimento para aves de páramo e hidrológicas como regulación hídrica y condensación del agua de la neblina (Caceres, 2007).

Los bosques de *Polylepis reticulata* durante los últimos 20 años han sufrido graves afecciones debido al impacto de las actividades humanas, aumentando su degradación y

fragmentación conjuntamente con los pajonales andinos, disminuyendo notoriamente su capacidad de recuperación, por lo que los bosques mejor conservados se encuentran en fragmentos rocosos con nula probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (Ramos, Buitrago, Pulido, y Vanegas, 2013).

La especie *Polylepis* posee ajustes morfológicos y fisiológicos para aumentar la resistencia ante temperaturas de congelación, a través de una eficiencia fotosintética, regulaciones hídricas en la hoja e intercambio de gases (Trinidad y Cano, 2016).

La respuesta fenológica de *Polylepis reticulata* es condicionada por fluctuaciones térmicas, disminuyendo el crecimiento, la mayor actividad vegetativa se registran en meses de septiembre y mayo (floración), que son meses con menor precipitación (Saravia y Vintimilla, 2016).

Estudios de la especie *Polylepis* en el páramo de la Rusia de Colombia (Villota, 2012) se han concentrado en determinar la diversidad asociada de aves, en Ancash – Perú (Castro y Flores, 2015) se ha investigado la edad y conservación de los bosques de *Polylepis*, un estudio en el Parque Nacional Cajas indica la descomposición de hojarasca y la afección de los flujos de carbono por el cambio climático (Pinos, Studholme, Carabajo, y Gracia, 2017), en la cuenca del Zhurucay de la provincia del Azuay se ha estudiado el funcionamiento hidrológico de los páramos andinos (Correa et al., 2016), por lo que las investigaciones mencionan muy poco de las capacidades adaptativas y efectos ante factores ambientales sobre *Polylepis reticulata*.

Un desequilibrio de factores climáticos puede poner en peligro todas las funciones ecológicas e hidrológicas que los bosques y la especie *Polylepis reticulata* desempeña en los páramos andinos (Zutta et al., 2012).

Estudios de flora, gases atmosféricos y variables climatológicas se vienen realizando en investigaciones ecuatorianas durante la última década a través de la técnica de teledetección, la cual se fundamenta en adquirir información de las zonas que se desea estudiar sin tener contacto directo con la misma. Esto es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres, las cuales tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores ambientales como por las características fisicoquímicas en el momento de la toma de la imagen. Esta información es receptada por satélites artificiales los cuales se encuentran orbitando la Tierra (Gutiérrez, 2006).

El programa Landsat posee satélites que fueron puestos en órbita para la observación en alta resolución de la superficie terrestre; Landsat orbita en órbita circular heliosincrónica,

a una altura de 705 Km alrededor de la Tierra (Sobrino, 2001), cuenta con varias misiones como Landsat 7 que está operativo desde 1999, el cual incluye una versión mejorada del sensor TM a la de su antecesor Landsat 5, el ETM (Enhanced Thematic Mapper) que incorpora una banda pancromática (0,5-0,9 μm) con una resolución espacial de 15m, el satélite Landsat 7 cuyas características se describen en la Tabla 1, sufrió un desperfecto el 31 de mayo del 2003 hasta la actualidad del Escáner Corrector Lineal (SLC), por lo que se ha logrado aprovechar tan sólo un 70% (Geocentro, 2017).

Tabla 1. Características del satélite Landsat 7

Bandas	Longitud de Onda (nm)	Resolución espacial (m)
1-AZUL	450-515	30
2 -VERDE	525-605	30
3 –ROJO	630-690	30
4-INFRAROJO CERCANO (NIR)	775-900	30
5- INFRAROJO DE ONDA CORTA (SWIR)	1550-1750	30
6 – INFRAROJO TÉRMICO	10400-12500	60
7 – INFRAROJO DE ONDA CORTA (SWIR)	2090-2350	30
8- PANCROMÁTICA	520-900	15

Fuente: (USGS,2017).

Por otra parte, Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite más completo respecto a Landsat 7, se encuentra a una altitud de órbita de 705 Km, con una expectativa de vida de 2013-2018, posee suministros hasta 2023, con una resolución temporal de 16 días, además posee funciones mejoradas para monitorear la calidad del agua y nubes atmosféricas altas, contiene dos sensores: el Sensor Operacional de Imágenes de tierra (OLI) y un Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

OLI está formado por 9 bandas que van desde lo visible, infrarrojo hasta el espectro de radiación de bajas ondas. TIRS está formado por dos bandas espectrales, que detectan infrarrojos térmicos. Algunos detalles de este satélite se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del satélite Landsat 8

Bandas	Longitud de Onda (μm)	Resolución espacial (m)
1 COASTAL AEROSOL	0.3	30
2 – AZUL	0.45 – 0.51	30
3 – VERDE	0.53 – 0.59	30
4 – ROJO	0.64 – 0.67	30
5- INFRAROJOS	0.85 – 0.88	30
6 - SWIR 1	1.570 – 1.650	30
7 - SWIR 2	2.110 – 2.290	30
8- PANCROMÁTICA	0.5 – 0.68	15
9- CIRRUS	1.360 – 1.380	30
10-INFRAROJOS TÉRMICOS 1	10.600 – 11.190	100 (*30)
11-INFRAROJOS TÉRMICOS 2	11.500 – 12.510	100 (*30)

* Las bandas 10 y 11 se obtienen a una resolución espacial de 100 m y son pre procesadas a 30m.

Fuente: (NASA, 2017).

Landsat 7 y 8 son satélites de que pueden utilizarse para el monitoreo de diferentes factores ambientales, los cuales pueden causar graves consecuencias en el futuro, por lo que el estudio y desarrollo de nuevas aplicaciones es de gran importancia, en especial para el monitoreo del ozono troposférico.

A través de la percepción remota es posible monitorear y medir variables ambientales, dentro de ella el uso de imágenes satelitales, se ha convertido en una importante fuente de información y herramienta para el manejo y análisis de información de gases, no sólo a escalas locales sino a nivel global (Salinero, 2008). El ozono se puede medir con las imágenes satelitales debido a que posee una atenuación de radiación UV a 254 μm (Navarro-Comas et al., 2008), por lo que la cuantificación y monitoreo de este gas es posible y mediante imágenes satelitales se pueden extraer productos de alta calidad.

El objetivo general de esta investigación es determinar los efectos del ozono troposférico en la fisiología de *Polylepis reticulata* en el Parque Nacional Cajas, a partir de la cuantificación de la concentración de ozono troposférico mediante valores de reflectancia de imágenes satelitales Landsat 7 o Landsat 8 y la correlación respectiva con variables meteorológicas de la zona de estudio y fisiológicas de *Polylepis reticulata*, para lo cual se han planteado los siguientes objetivos específicos: 1) Delimitar la ubicación y el tamaño de los bosques de *Polylepis reticulata* del Parque Nacional Cajas. 2) Determinar la concentración de ozono troposférico disperso en el Parque Nacional Cajas mediante



análisis multi-temporal con imágenes satelitales desde el año 2011 hasta el 2014. 3) Estimar la concentración de ozono presente en la clorofila de las hojas de *Polylepis reticulata* mediante espectrometría. 4) Correlacionar las concentraciones del ozono determinado a través de las imágenes satelitales, el ozono encontrado a través de la espectrometría y variables meteorológicas. 5) Determinar los efectos del ozono troposférico en la fisiología del *Polylepis reticulata*.

2. Metodología

Esta investigación es de tipo exploratorio y correlacional para determinar la relación del ozono troposférico medido a partir de un modelo estadístico generado mediante la reflectancia de imágenes satelitales Landsat 7 y 8, con las concentraciones de clorofila *a*, clorofila *b*, concentración de ozono en clorofila, altura del árbol, diámetro a la altura del pecho (DAP), ancho de copa y variables meteorológicas.

La deducción del modelo de investigación se basó en datos cuantitativos, mediante un análisis deductivo, partiendo de un modelo preliminar (Ilustración 1), que relacionó los valores de reflectancia en el tope de la atmósfera TOA (TOP Of the Atmosphere) con los valores de los niveles digitales de cada una de las bandas multispectrales tanto de imágenes Landsat 7 y 8 del Parque Nacional Cajas, aplicando este modelo preliminar para los dos satélites antes mencionados.

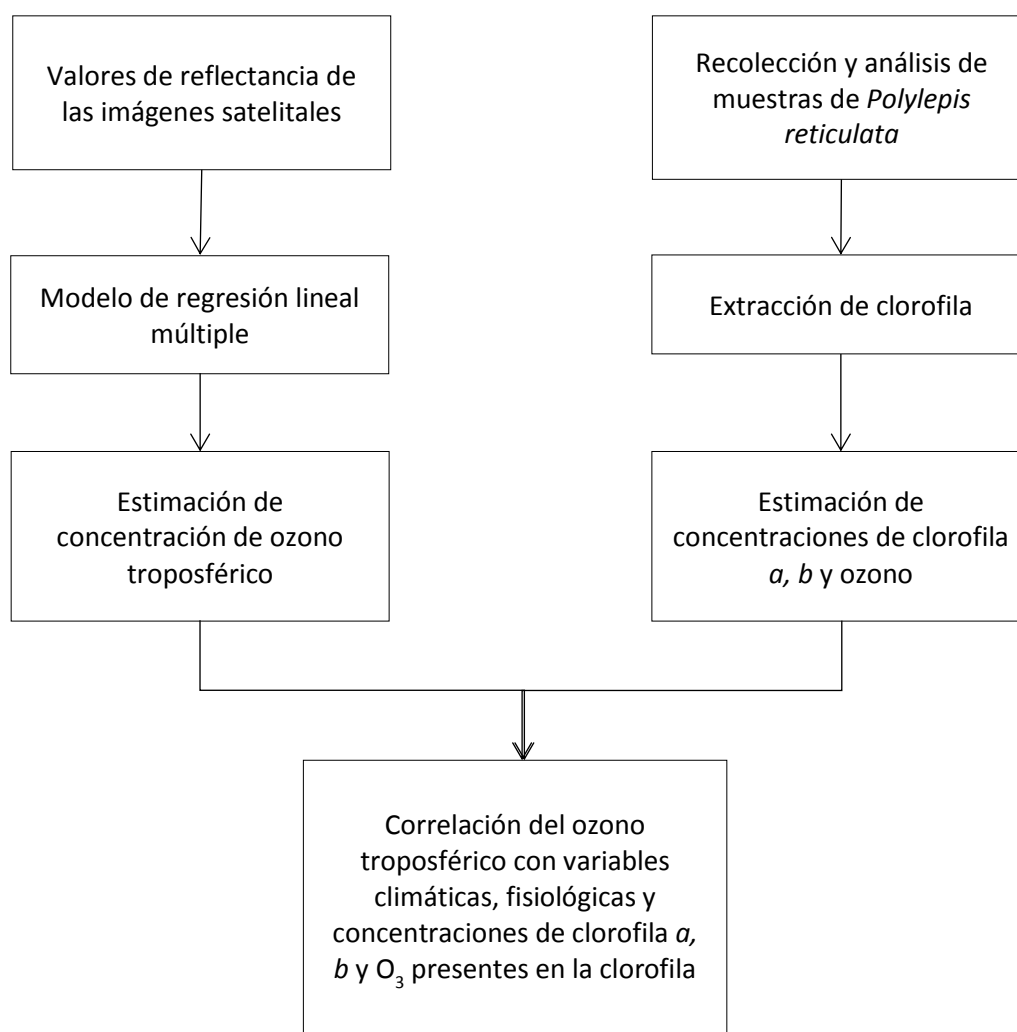


Ilustración 1. Modelo de Investigación

Para la determinación de efectos en la fisiología de la especie *Polylepis reticulata* hay variables difíciles y costosas de estimar como la determinación de fotosíntesis, flujo de agua, evapotranspiración, etc. Por lo que este estudio se centró en la estimación de variables de fácil medición y que demandan menores recursos económicos y tiempo de muestreo como el contenido de clorofila *a*, clorofila *b* y clorofila total en las hojas (Rodríguez, 2012).

2.1. Área de estudio y puntos de muestreo.

El Parque Nacional Cajas fue elegido como el área de estudio por los monitoreos y datos de ozono troposférico, datos de variables meteorológicas, importancia ambiental, social, cultural y económica que representa éste para las ciudades y poblaciones que se benefician del uso de sus recursos naturales, presencia de *Polylepis reticulata*.

Para la determinación de los puntos de muestreo, se establecieron 191 bosques del Parque Nacional Cajas de las especies presentes en la zona, mediante ortofotos de la zona de estudio, en cada uno de ellos se dibujó el polígono, se realizó la visita a todos los bosques y se verificó que tengan la especie *Polylepis reticulata*, con lo cual se identificó 31 bosques *Polylepis reticulata* (Ilustración 2).

Se realizó un muestreo aleatorio simple con un individuo de cada bosque para la toma de muestras y datos de los individuos, logrando muestrear e identificar 31 individuos de esta especie en 31 bosques diferentes, para el ingreso a esta área protegida se recurrió a obtener la autorización de investigación científica con N° 127-2017-DPAA/MAE.

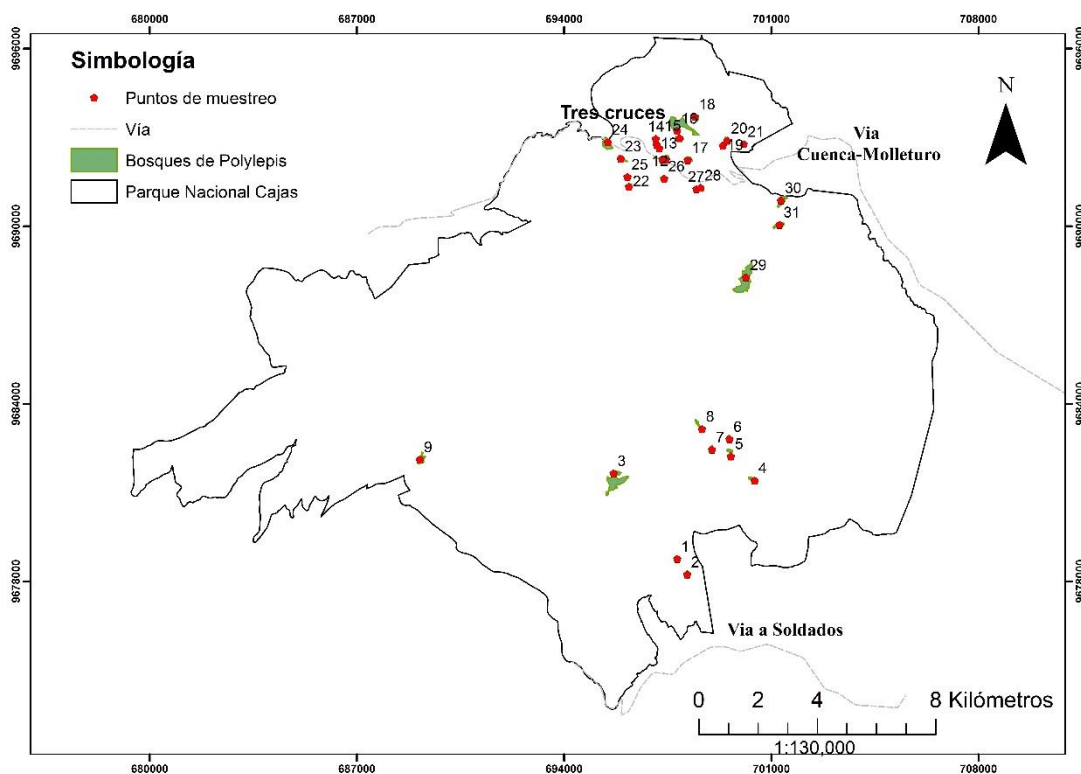


Ilustración 2: Localización de los bosques de *Polylepis reticulata* y puntos de muestreo

Para medir la altura del árbol y ancho de copa se utilizó la regla telescópica y escalado con la ayuda de un asistente (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

En la medición del diámetro altura pecho (DAP), se procedió a una altura de 1.30 m, para medir la circunferencia se utilizó cinta métrica (Archila y González, 2014).

La recolección de las hojas se realizó en tubos tipo Falcon de 50 ml, el peso de la muestra varía entre los 10 g y 15 g, cada hoja es recolectada con medidas estrictas de asepsia para evitar la contaminación de las muestras (Muñoz y Yáñez, 1996).

2.2. Análisis de muestras y generación de información necesaria para el análisis de resultados.

El procedimiento para la determinación de clorofila *a*, *b* y ozono en la clorofila de *Polylepis reticulata* es experimental y sigue los mismos lineamientos de otros estudios en especies diferentes (Knudson y Tibbitts, 1977).

Se procedió a la extracción de clorofila de las hojas de clorofila y procedimientos de análisis para el área foliar de las plantas.

La muestra de hojas es de entre 10 – 15 gramos, los peciolo de las hojas unifoliadas fueron extirpados (excluyendo el pulvínulo superior) porque afectan directamente en las

concentraciones de clorofila al seguir estimulando el proceso de la fotosíntesis, cada hoja se enrolló, dobló, y se colocó en un tubo tipo Falcon de 50 ml.

Cada tubo se llenó de etanol con 96% de pureza hasta que esté cubierta el 100% de la muestra, se tapó y almacenó en la oscuridad.

Después de 24 horas en el almacenamiento, la solución de etanol- clorofila se decantó en un frasco plástico negro de 500 ml. El tubo tipo Falcon de 50 ml que contiene las hojas luego se enjuagó llenándolo entre la mitad y dos tercios con etanol, y se añadió la solución de enjuague para el frasco plástico negro de 500 ml. El procedimiento se lo realizó evitando la prolongada exposición a la luz de las muestras y se repitió tres veces con periodos de 24h. Luego del enjuague final, los tubos tipo Falcon de 50 ml con las hojas se colocaron en un horno de secado a 36 °C, se secó durante 3 días y luego se pesó.

La solución de etanol- clorofila se decantó en un matraz de 200-ml y se llenó hasta 200 ml de etanol con 96% de pureza.

Se extrajo una alícuota de 10 ml para los cálculos espectrométricos y el resto se descartó. Primero se calculó la absorbancia a 254 nm del ozono en la alícuota, debido a que el ozono reacciona con longitudes de onda mayores a 320 nm, rompiéndose en moléculas de oxígeno, el oxígeno libre reacciona con otros átomos de oxígeno formando oxígeno molecular (Alonso, 2013).

La absorbancia del extracto de clorofila se calibró a 665 nm y 649 nm, las cuales se miden por espectrometría para la clorofila *a* y *b* respectivamente. Para convertir estas lecturas al contenido de la clorofila de la hoja, se utilizaron las ecuaciones (8), (9) y (10) que están basadas en la Ley de Lambert-Beer (Knudson y Tibbitts, 1977).

$$\frac{\mu g \text{ Chl } a}{ml \text{ solución}} = (13.70)(A_{665 \text{ nm}}) - (5.76)(A_{649 \text{ nm}}) \quad (8)$$

$$\frac{\mu g \text{ Chl } b}{ml \text{ solución}} = (25.80)(A_{649 \text{ nm}}) - (7.60)(A_{665 \text{ nm}}) \quad (9)$$

En donde que $\mu g \text{ Chl } a$ es la concentración en microgramos de clorofila *a*, $\mu g \text{ Chl } b$ es la concentración en microgramos de clorofila *b*, $A_{665 \text{ nm}}$ es el valor de la absorbancia medida a una longitud de onda de 665nm, $A_{649 \text{ nm}}$ es el valor de la absorbancia medida a una longitud de onda de 649nm.

La concentración de clorofila total es expresada en la ecuación (10) como μg clorofila / mg en peso seco.

$$\frac{\mu g \text{ Chl } a + \mu g \text{ Chl } b}{\text{peso seco de muestra}} = \frac{[\mu g \text{ Chl}]}{[mg]} \quad (10)$$

En la cuantificación del ozono en la clorofila se utilizó la espectrometría.

Con una calibración de 254 nm y mediante la Ley de Lambert – Beer (Valenciaga y Oliveira, 2006), se logró cuantificar la concentración de ozono en la clorofila, esta ley introduce los conceptos de la absorbancia y transmitancia de una muestra en función de una longitud de onda específica que es emitida por el espectrómetro, esta ley se representa en la siguiente ecuación:

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (11)$$

En donde:

- A es la absorbancia.
- l es la longitud de la cubierta o camino óptico expresado en cm, en este caso es 1 cm la longitud de celda del espectrómetro empleado.
- c simboliza la concentración del soluto en mol/l.
- ε es la absortividad molar o coeficiente de extinción molar que representa la capacidad que tienen los compuestos químicos para absorber una onda de luz (Díaz et al., 2000) las unidades de esta constante son en l/mol.cm, en este caso de estudio la absortividad molar del ozono es de 2900 l/mol.cm (Quispe, Astudillo, Villasenor, y Delgadillo, 2010).

Utilizando esta ecuación y despejando c, la nueva ecuación queda de la siguiente manera:

$$c = \frac{A}{\varepsilon \cdot l} \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right] \quad (12)$$

Esta permite obtener la concentración del ozono presente en la clorofila, sin la necesidad de curvas de calibración. Esto es porque ya se cuenta con la constante de absortividad molar y la longitud de onda pico de la absorbancia del ozono.

2.3. Información utilizada en la investigación.

Para este estudio se obtuvieron datos mensuales de ozono troposférico, provenientes de 5 estaciones de los informes de calidad de aire del Parque Nacional Cajas reportados por EMOV- EP de los años 2011, 2012, 2013 y 2014, la estación de Burines empezó a reportar datos a partir del mes de septiembre de 2011.

Se contabilizó un total de 232 datos de concentraciones de ozono que sirvieron para la validación de los modelos estadísticos emitidos para determinar ozono troposférico a partir de las imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8.

Los datos proporcionados por EMOV-EP, corresponden a estaciones pasivas para el monitoreo de ozono troposférico, están ubicadas a diferentes altitudes, poseen datos confiables y representativos para la validación del modelo estadístico para la estimación de ozono troposférico a partir de imágenes Landsat 7 y 8. Las ubicaciones de estas estaciones en el Parque Nacional Cajas se encuentran en la Tabla 3 y en la Ilustración 3:

Tabla 3. Coordenadas (WGS84) de las estaciones de monitoreo de calidad de aire en el Parque Nacional Cajas

Nombre de la estación	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud
			(m.s.n.m.)
Llaviuco	706174.06	9685401.71	3171
Quinoas	700865.84	9692042.42	3880
Toreadora	697629.11	9692167.02	3960
Tres Cruces	695567.07	9692853.86	4145
Burines	697640.01	9691704.01	4136

Fuente: (EMOV, 2012).

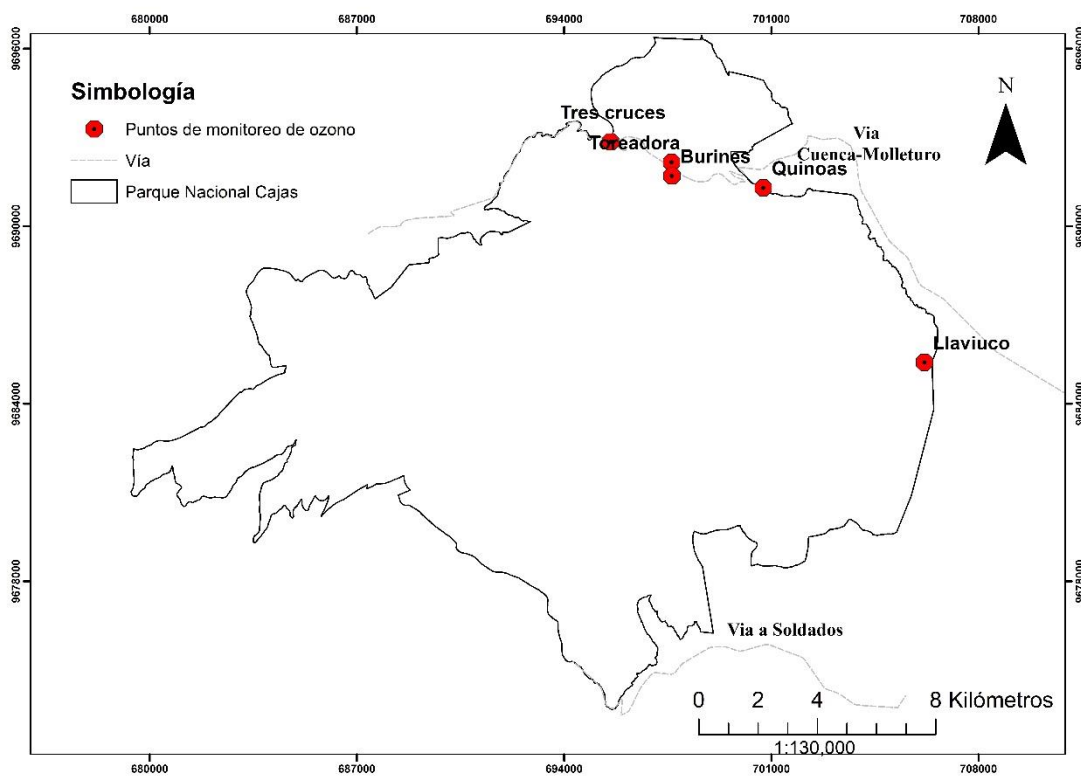


Ilustración 3. Puntos de monitoreo de la calidad de aire de la EMOV-EP

La metodología pasiva del monitoreo del ozono troposférico se rige en la Ley de Fick, la cual relaciona el flujo de un gas que propaga de una zona de alta concentración hacia otra de menor concentración.

Los medidores pasivos que utiliza EMOV-EP presentan en un extremo del tubo una abertura y un volumen de aire en el cual se produce un gradiente de concentraciones desde la parte externa del tubo en contacto con el ambiente exterior y con una concentración ambiental, en la parte interna, en el cual se encuentra el agente absorbente y cuya concentración es nula del contaminante a determinar.

Esta diferencia de concentraciones generado es la fuerza que mueve al contaminante por difusión a través del captador hasta llegar al absorbente (Ospina y Garrido, 2013).

Es por estas razones que el muestreador pasivo para ozono consta de un cuerpo polimérico cilíndrico y una apertura de broce dentado.

Aquí realiza la cuantificación de ozono troposférico la EMOV-EP basándose en el método de Palmer, debido a que no requiere energía eléctrica para la operación, el contaminante es colectado selectivamente por difusión molecular.

Se utiliza el tubo de polipropileno de 9.5 mm de diámetro interno y 5.5 cm de largo, con un filtro absorbente de fibra de vidrio, preparado con el reactivo DPE (1,2di-4piridil-etileno), este tubo es colocado bajo cubierta plástica para protección contra la lluvia, el viento y el sol, para el caso de Cuenca esta exposición dura entre 10 a 12 días consecutivos, dos por mes (EMOV, 2016).

Los filtros luego se llevan a un análisis por cromatografía iónica, para determinar la concentración del nitrato procedente de la oxidación del nitrito por la acción oxidante del ozono (Madruga, Patier, Ramiro, y Garraleta, 2001).

También se recopiló información de estaciones meteorológicas de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, cuyas estaciones están próximas al área de estudio, las coordenadas se representan en la

Tabla 4.

Tabla 4: Coordenadas (WGS84) de las estaciones meteorológicas utilizadas de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca

Estación	X	Y	Altura m.s.n.m.
Baños	712899.00	9672817.00	3062
Molleturo	676435.00	9692152.00	3524
Tixan-Chiquintad	723017.00	9686678.00	2725

San Joaquín	714405.00	9680807.00	2764
Chauca	672859.00	9678690.00	1896

La estaciones proporcionan datos de diferentes variables, en este estudio se utilizaron 5 variables meteorológicas (Tabla 5), los datos liberados por esta institución corresponden a valores de cada hora, para lo cual se optó por realizar el promedio diario y mensual de temperatura, radiación, presión y humedad relativa, los valores de precipitación se sumaron para obtener una total mensual de precipitación.

Tabla 5: Variables y unidades de los datos utilizados en esta investigación

Variables	Unidades
Temperatura	°C
Precipitación	mm
Radiación	W/m ²
Presión	hPa
Humedad relativa	%

Estos datos se interpolaron con el método de ponderación por distancia (IDW) en el Software ARCGIS 10.3 para rellenar datos en los puntos muestreados de *Polylepis reticulata*, todos estos resultados se los usa para las correlaciones de los resultados de ozono troposférico obtenidos a partir de las combinaciones de reflectancias de las bandas de imágenes satelitales y los análisis espectrométricos.

Las imágenes satelitales corresponden a los satélites Landsat 7 y Landsat 8.

Para Landsat 7 el sensor presenta imágenes que consisten en siete bandas espectrales, cuyas bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 poseen una resolución espacial de 30 m. En el caso de la banda 8 (panchromatic) la resolución espacial es de 15 m. Todas las bandas pueden recolectar una de dos configuraciones de ganancia (baja o alta) para aumentar la sensibilidad radiométrica y el rango dinámico, mientras que la banda 6 recoge tanto la ganancia baja como alta (bandas 6.1 y 6.2, respectivamente) para todas las imágenes. Por otra parte, las imágenes del satélite Landsat 8 contienen nueve bandas espectrales, de las cuales las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 poseen una resolución espacial de 30 m, las bandas 10 y 11 son llamadas térmicas y se utilizan para proveer temperaturas superficiales con una mayor precisión de la zona captada por este satélite y se recogen a 100 m (Barsi, Lee, Kvaran, Markham, y Pedelty, 2014).

Cada una de las imágenes se obtuvieron a partir de la base de datos de la USGS [<http://earthexplorer.usgs.gov>], en cuyo buscador se determinaron descargar imágenes

satelitales pertenecientes a los años 2011, 2012, 2013, 2014 y la imagen con la fecha más cercana al monitoreo realizado en el presente estudio, la cual fue la perteneciente a Landsat 8 del 20 de noviembre de 2016.

La selección de las imágenes fue mediante la pre-visualización de las misma en la plataforma de la USGS, con lo cual se eligió imágenes con poca presencia de nubes para que éstas no interfieran en los análisis y resultados.

En esta investigación se valoró una imagen por año para analizar y emitir dos modelos de regresión lineal para la determinación del ozono troposférico mediante imágenes Landsat 7 y 8. Las imágenes seleccionadas para el estudio se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6. Imágenes Landsat 7 y 8 utilizadas en la investigación

Satélite	Nombre de la imagen satelital	Fecha
Landsat 7	LE70100622011287ASN00	14/10/2011
Landsat 7	LE70100622012354EDC00	19/12/2012
Landsat 8	LC80100622013124LGN01	04/05/2013
Landsat 8	LC80100622014303LGN00	30/10/2014
Landsat 8	LC0801006220161120_T1	20/11/2016

2.4. Procesamiento y análisis de la información recolectada a través de imágenes satelitales.

Las imágenes Landsat 7 y Landsat 8 fueron proporcionadas por la USGS que emite datos en el formato GeoTIFF con metadatos, con lo cual cualquier software especializado en procesamiento de imágenes satelitales puede convertir fácilmente los datos de banda óptica a valores de reflectancia (TOA), generalmente es utilizado el método de escalado de resplandor espectral, cuya fórmula es la siguiente:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (13)$$

En donde que L_{λ} es el valor de la celda como radiance, $QCAL$ es el número digital, $LMIN_{\lambda}$ son las escalas de radiancia espectral a $QCALMIN$, $LMAX_{\lambda}$ son las escalas de radiancia espectral a $QCALMAX$, $QCALMIN$ es el valor de píxel calibrado cuantificado mínimo (típicamente = 1), $QCALMAX$ es el valor de píxel calibrado cuantificado máximo (típicamente = 255); con lo cual el valor de la radianza a reflectancia TOA parte de la siguiente fórmula:

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * \frac{d^2}{ESUN_{\lambda}} * \cos\theta_s \quad (14)$$

En esta fórmula ρ_{λ} representa la reflectancia planetaria sin unidad, L_{λ} significa la radiancia espectral (desde el paso anterior), d es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas, $ESUN_{\lambda}$ son las irradiancias exoatmosféricas medias y θ_s es ángulo zenital solar. En esta investigación todos estos procedimientos son realizados internamente por el software QGIS versión 2.10.1 – Pisa, con ayuda de Semi-Automatic Classification Plugin versión 4.9.3 – Frascati, desarrollado por Lucas Congedo que permite realizar la clasificación semi-automática y supervisada de imágenes satelitales, pre-procesamiento de imágenes, post-procesamiento de clasificaciones y cálculos ráster de cada una de las bandas de las imágenes (Congedo & Munafò, 2012).

Estos procesos crean nuevos archivos con valores de reflectancia que oscilan entre 0,0 y 1,0 (YALE, 2017).

2.5. Modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de ozono troposférico a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8.

Para la obtención del modelo se utilizó el software Excel 2016 para crear cada uno de los modelos de regresión lineal múltiple. Se inició estableciendo combinaciones de todas las bandas, luego de seis, cinco, cuatro y tres de todas las bandas, aplicando este proceso tanto de Landsat 7 y 8, obteniendo las bandas con mayor peso sobre la detección de ozono y deduciendo así las mejores combinaciones de las bandas.

La regresión lineal múltiple intenta modelar la relación entre dos o más variables explicativas que en este caso corresponden a los valores de radianza de cada una de las bandas de las imágenes satelitales con una variable de respuesta, en este caso el gas a monitorear que es el ozono troposférico, ajustando una ecuación lineal a los datos observados. Cada valor de la variable independiente x está relacionado con un valor de la variable dependiente y .

$$y = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad (15)$$

En donde y representa la variable independiente o variable respuesta, X_i es la variable explicativa, dependiente o regresora, C_i son las constantes que están determinadas empíricamente; como los valores observados varían en función de sus medias, el modelo de regresión lineal múltiple incluye un término para esta variación llamado residual, que representa las desviaciones de los valores observados y de sus medias, que normalmente se distribuyen con media 0 y varianza ρ (Daniel y Cross, 1995).

2.6. Validación del modelo.

Con los modelos generados se obtuvo el coeficiente de Pearson, cada uno de ellos mayores a 0.5 ($R^2 > 0.5$), con lo que cumple con el criterio de nivel de significancia menor al 5% ($p < 0.05$), por lo tanto se logró obtener modelos que cumplen los criterios. Este método analiza los conjuntos de datos extraídos de reflectancia de las bandas de las imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8, comparándolos con valores realistas mediante el coeficiente de Pearson.

Estos valores son los datos de ozono troposférico medidos mediante una metodología pasiva de la EMOV EP de diferentes puntos del Parque Nacional Cajas, con lo cual se establece la concordancia de datos, aceptando los modelos como predictivos (Chirico y Gramatica, 2011).

2.7. Correlación de resultados.

Para la correlación de resultados de las concentraciones de clorofila *a*, clorofila *b*, ozono presente en la clorofila, altura del árbol, diámetro a la altura del pecho (DAP), ancho de copa, ozono troposférico estimado a partir de imágenes satelitales, temperatura, precipitación, radiación, presión atmosférica, humedad relativa y altura, se utilizó el coeficiente de Pearson o R^2 , debido a que es una prueba estadística con la cual se puede analizar la relación que existe entre dos variables medidas en un nivel de intervalos, midiendo el grado de asociación lineal que existe entre dos variables.

Esta prueba no considera a una variable como independiente y a otra como dependiente, debido a que no es una prueba que evalúe causalidad, los valores de este coeficiente varían de -1 a 1, cuyo signo indica la dirección de la correlación, valor numérico y magnitud de la correlación, por lo que se puede obtener varios criterios de interpretación como los explicados en la Tabla 7 (Triola, 2004).

Tabla 7. Interpretación de los valores del Coeficiente de Pearson

VALOR	INTERPRETACIÓN
-1,0	Correlación negativa perfecta
-0,9	Correlación negativa muy fuerte
-0,75	Correlación negativa considerable
-0,50	Correlación negativa media.
-0,10	Correlación negativa débil.
0,00	No existe correlación lineal alguna entre las variables.
0,10	Correlación positiva débil
0,50	Correlación positiva media
0,75	Correlación positiva considerable.
0,90	Correlación positiva muy fuerte.
1,00	Correlación positiva perfecta.

Fuente: (Triola, 2004)

A partir de esta tabla podemos deducir la relación existente entre el ozono troposférico obtenido a partir de imágenes satelitales con las concentraciones de clorofila *a*, clorofila *b*, ozono presente en la clorofila, altura del árbol, diámetro a la altura del pecho (DAP), ancho de copa y variables meteorológicas.

3. Resultados

3.1. Análisis de información *in situ*

Con la información procedente del monitoreo que realiza la EMOV-EP, en sus informes anuales de las concentraciones de ozono troposférico, se pudo observar tendencias en cuanto al comportamiento del ozono a lo largo de periodos de tiempo y diferentes pisos altitudinales, cuyo análisis se basó en el periodo de 2011-2014.

El comportamiento del ozono troposférico durante el periodo 2011-2014 presenta variaciones significativas en cada uno de los puntos de monitoreo (Ilustración 4), en estación de Llaviuco presenta una desviación estándar de 10.71 y los menores niveles de ozono troposférico a lo largo de todo el período de estudio, situándose con valores máximos de $53.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores mínimos de $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la estación de Quinoas presenta una desviación estándar de 13.28 y valores máximos de $67.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos de $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la estación de Toreadora presenta una desviación estándar de 19.97 y valores altos de ozono con máximos de $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos de $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto a la estación de tres cruces presenta una desviación estándar de 21.10 y valores altos y similares a los registrados en la estación de Toreadora con valores máximos de $103.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos de $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación de Burines presenta una desviación estándar de 23.39 y valores mínimos de $22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximos de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cuyos valores son los más altos registrados mediante monitoreo pasivo en el Parque Nacional Cajas.

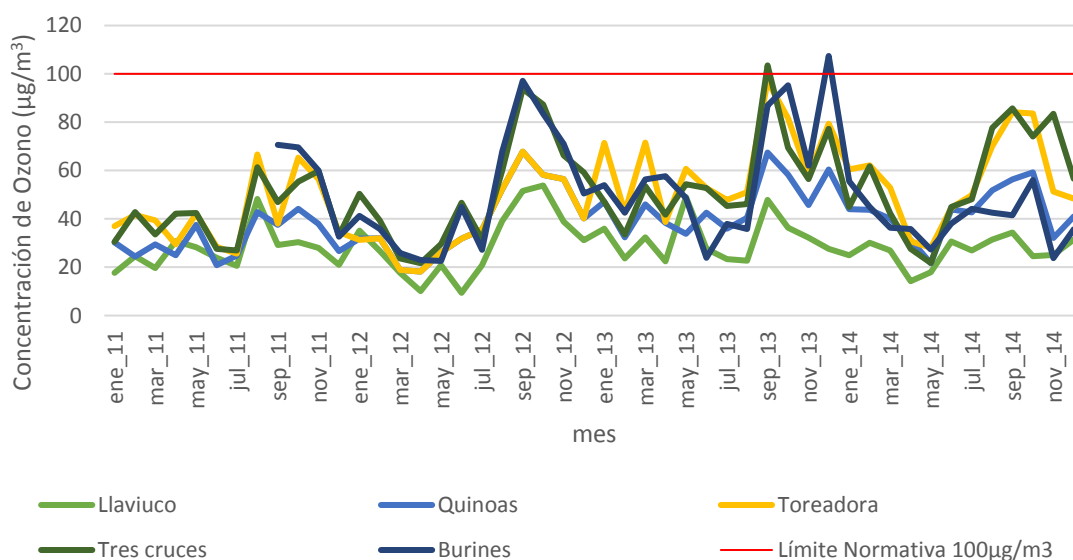


Ilustración 4. Comportamiento del ozono troposférico durante el periodo 2011-2014

Además, anualmente los mayores valores pertenecen a las estaciones de Toreadora y Burines, esto se debe a que en los meses de agosto, septiembre, octubre y diciembre se registran una menor precipitación y mayor exposición a la radiación UV.

La estación de Llaviuco es la estación que presenta los valores más bajos del ozono troposérico.

Con relación a todos estos datos analizados y tomando en cuenta que el límite de ozono troposférico en la normativa ecuatoriana es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es la concentración máxima en 8 horas consecutivas de exposición, y la única respecto a límites permisibles del ozono, se puede observar que los promedios anuales no supera esta normativa, pero a niveles de los promedios mensuales este gas supera la normativa, específicamente en los meses de septiembre y enero de 2013.

Se monitoreó las variables de DAP, altura del árbol, ancho de copa y hojas de la especie *Polylepis reticulata*, obteniendo muestras con un peso máximo de 2235.8 mg de hojas en peso seco y con un mínimo de 639.4 mg de hojas en peso seco, éstos datos están representados en la Tabla 8.

Tabla 8. Ubicación de los puntos de muestreo (WGS84) y variables fisiológicas de las especies muestreadas

Número de muestra	X	Y	Copa [m]	Altura [m]	DAP [m]	Peso mg
1	697824.59	9678759.43	3.6	4.3	0.62	2110.1
2	698159.65	9678231.49	2.7	3	0.34	790.4
3	695673.91	9681646.81	7	8.8	2.78	960.0
4	700439.66	9681405.52	2.2	3.8	0.4	910.3
5	699638.59	9682219.15	4.2	6	0.77	1940.2
6	699590.85	9682805.41	1.4	2.2	0.22	1310.1
7	699000.45	9682448.62	2.2	4.8	0.41	1220.0
8	698660.38	9683146.77	6.4	6.8	0.53	810.4
9	689130.88	9682112.39	5	7	2.37	840.8
10	697450.06	9692241.60	5.5	4.3	1.8	936.5
11	697325.54	9692256.16	2.5	3.3	0.7	1181.5
12	697219.34	9692623.47	4	5.5	1.5	1103.8
13	697132.78	9692741.98	8	9.15	2.15	839.5
14	697099.73	9692946.56	5	6	0.6	782.9
15	697900.40	9692973.00	6	4	1.5	751.6
16	697821.82	9693218.62	3	3	0.8	1660.1
17	698180.62	9692229.44	2	2.3	0.4	1685.5
18	698416.35	9693697.67	2.5	3	1	922.7
19	699367.86	9692721.96	3.5	4.5	1.85	797.3
20	699516.00	9692886.51	4	6	0.95	1895.8
21	700068.49	9692770.66	3.2	3.8	2.2	639.4
22	696190.07	9691330.02	5.8	4.7	1.1	1981.3
23	695918.00	9692283.08	5.6	5	0.78	2235.8
24	695482.04	9692839.10	2.4	1.8	0.82	698.6
25	696141.01	9691662.19	6.7	6.2	0.87	1575.6
26	697384.09	9691603.32	5.2	6.6	2.2	1282.1
27	698473.02	9691251.09	12	8	2.15	1385.2
28	698613.08	9691293.12	7.2	8.8	2.2	1344.2
29	700144.10	9688266.81	1.7	2.4	0.47	1109.8
30	701328.11	9690868.82	4.8	6.3	1.73	1270.9
31	701279.58	9690048.03	1.9	2.6	0.7	1935.4

Los datos de las variables antes descritas se utilizaron como indicadores de crecimiento para correlacionar los datos con las variables fisiológicas de clorofila *a*, clorofila *b* y clorofila total, dichos indicadores se utilizan para verificar la eficiencia de los procesos fisiológicos de las plantas (Rodríguez, 2012).

3.2. Análisis y validación de los modelos generados

De acuerdo a las combinaciones realizadas de las reflectancias de cada banda de las imágenes satelitales (TOA) se obtuvieron distintos modelos estadísticos de regresión lineal múltiple, cuyos resultados se muestran en la Tabla 9, en la cual cumplen con los criterios establecidos con el coeficiente de Pearson.

Tabla 9. Combinaciones de reflectancias de Landsat 7

Landsat 7		
Modelo	Ecuación	R ²
A	$O_3[\mu g/m^3] = [48.28201747 + (-56.23989124 * TOA_b2) + (-86.44739894 * TOA_b4) + (163.6042733 * TOA_b7)]$	0.6921
B	$O_3 [\mu g/m^3] = [48.85513507 + (-67.14514828 * TOA_b2) + (-75.29692493 * TOA_b4) + (-34.35273733 * TOA_b5) + (202.7098791 * TOA_b7)]$	0.6979
C	$O_3 [\mu g/m^3] = [51.56672837 + (-221.5443065 * TOA_b1) + (321.5443065 * TOA_b2) + (-121.6212337 * TOA_b3) + (-107.9797359 * TOA_b4) + (7.680394973 * TOA_b5) + (136.2843248 * TOA_b7)]$	0.6870

El mejor resultado para Landsat 7 es del modelo B, el cual se representa en la ecuación (16) que se muestra a continuación:

$$O_3[\mu g/m^3] = [48.85513507 + (-67.14414828 * TOA_B2) + (-75.29692493 * TOA_B4) + (-34.35273733 * TOA_B5) + (202.7098791 * TOA_B7)] \quad (16)$$

Las concentraciones del O_3 se dan en microgramos por metro cúbico $[\mu g/m^3]$ que está en función de los parámetros de reflectancia de las bandas multiespectrales del satélite Landsat 7.

TOA_B2 representa la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 2.

TOA_B4 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 4.

TOA_B5 significa la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 5.

TOA_B7 representa la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 7.

La presencia de varias bandas del espectro visible en el modelo es debido a que la mayor incidencia de la radiación solar se da en el espectro visible que va desde los 400 – 700nm, lo cual induce a la formación de ozono (Camredon y Aumont, 2007).

La banda 2 – Verde actúa en la longitud de onda de entre los 0.45 – 0.52 μm , con una resolución espacial de 30 metros, la banda 4 – infrarrojo cercano (NIR) actúa en la longitud de onda entre los 0.77 – 0.90 μm , la banda 5- infrarrojo medio actúa en la longitud de onda entre los 1.55- 1.75 μm y la banda 7 – infrarrojo de onda corta (SWIR) actúa en el rango de longitud de onda de 2.08 – 2.35 μm (Barsi et al., 2014).

El coeficiente de Pearson (R^2) es de 0.6979, el cual es aceptable para el estudio, a pesar de que aparentemente es un número bajo, otros estudios presentan valores de entre 0.566 (Mallick y Kant, 2008) y 0.7 (Kloiber, Brezonik, Olmanson, y Bauer, 2002).

En la

Tabla **10** se presentan los coeficientes de la regresión, seguido del error típico, estadístico t, inferior 95%, superior 95%, inferior 99%, superior 99%, que son variaciones de los datos que por lo general son inevitables.

Tabla 10. Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de las reflectancias de Landsat 7

Variable	Coef.	Error típico	Estadístico t	Inf. 95%	Sup. 95%	Inf. 99.0%	Sup. 99.0%
Constante	48.86	1.05	46.55	46.79	50.92	46.14	51.57
TOA_B2	-67.15	15.82	-4.24	-98.23	-36.07	-108.05	-26.24
TOA_B4	-75.30	9.80	-7.68	-94.56	-56.04	-100.64	-49.95
TOA_B5	-34.35	22.51	-1.53	-78.57	9.86	-92.54	23.84
TOA_B7	202.71	28.40	7.14	146.91	258.51	129.28	276.14

Los valores de los coeficientes de la regresión lineal múltiple se representan en la Tabla 11, cuyos valores sirven como indicadores para la validación del modelo estadístico.

Tabla 11. Coeficientes del modelo estadístico de regresión lineal múltiple de Landsat 7

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.8354
Coeficiente de determinación R^2	0.6979
R^2 ajustado	0.4562
Error residual estándar en 3 grados de libertad.	6.6994

En cuanto al modelo elegido para el satélite Landsat 8, se procedió a elegir los modelos con el mayor coeficiente de Pearson, con el fin de que los resultados sean significativos, las combinaciones fueron realizadas con las diferentes bandas (TOA), los modelos con el valor más alto del coeficiente de Pearson se presentan en la Tabla 12, la cual se presenta a continuación:

Tabla 12. Combinaciones de las reflectancias de Landsat 8

Landsat 8		
Modelo	Ecuación	R²
D	$O_3 [\mu g/m^3] = [55.23306723 + (-268.0310236 * TOA_b2) + (241.0081773 * TOA_b4) + (-174.6730118 * TOA_b6) + (224.8194588 * TOA_b7)]$	0.5049
E	$O_3 [\mu g/m^3] = [50.40977326 + (179.1403044 * TOA_b2) + (-895.2883198 * TOA_b3) + (673.7465418 * TOA_b4) + (23.13053831 * TOA_b7)]$	0.5281
F	$O_3 [\mu g/m^3] = [54.72431448 + (-24.42575923 * TOA_b2) + (-644.0492874 * TOA_b3) + (627.5992663 * TOA_b4) + (-130.3915777 * TOA_b6) + (164.4717539 * TOA_b7)]$	0.5242

El modelo que cumple con las características y es más representativo es el modelo E, cuyo coeficiente de determinación o Pearson es de 0.5281, éste está representado por la ecuación (17):

$$O_3[\mu g/m^3] = [50.40977326 + (179.1403044 * TOA_b2) + (-895.2883198 * TOA_b3) + (673.7465418 * TOA_b4) + (23.13053831 * TOA_b7)] \quad (17)$$

En donde $[\mu g/m^3]$ representa la concentración de ozono troposférico en microgramos por metro cúbico en función de los parámetros de reflectancia de las bandas multiespectrales del satélite Landsat 8.

TOA_B2 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 2.

TOA_B3 significa la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 3.

TOA_B4 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 4.

TOA_B7 representa la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 7

La presencia de varias bandas del espectro visible y su correlación se da debido a que la mayor incidencia de la radiación solar se da en el espectro visible que va desde los 400-700nm, razón por la cual influye en la formación de ozono (Camredon y Aumont, 2007). El rango espectral del satélite Landsat 8 de la banda 2 – azul actúa en la longitud de onda de entre los 0.452 – 0.512 μm , con una resolución espacial de 30 metros, la banda 3 – verde actúa en la longitud de onda entre los 0.533 – 0.590 μm , la banda 4 – rojo actúa en la longitud de onda de entre los 0,636 – 0.673 μm y la banda 7 – infrarrojo de onda corta (SWIR) 2 actúa en el rango de longitud de onda de 2.107 – 2.294 μm (Barsi et al., 2014). El coeficiente de Pearson (R^2) para el modelo E es de 0.5281, se considera aceptable para el estudio, ya que en otros estudios realizados para validación de modelos estadísticos presentan valores de entre 0.48 (Wimberly y Reilly, 2007) y 0.77 (Couper, Kapteyn, Schonlau, y Winter, 2007).

En este caso también se realizó el análisis estadístico del modelo elegido para corroborar los valores de los coeficientes del modelo, estos resultados se presentan en la Tabla 13, la cual presenta diferentes variables producto de la regresión lineal múltiple.

Tabla 13. Análisis estadístico del modelo de regresión lineal para Landsat 8

Variable	Coef.	Error típico	Estadístico t	Inf. 95%	Sup. 95%	Inf. 99.0%	Sup. 99.0%
Constante	50.40977	1.08	46.77	48.44	52.69	47.77	53.36
TOA-B2	179.1403	60.65	2.97	60.83	299.06	23.21	336.68
TOA-B3	-895.2883	116.24	-7.81	-1136.63	-680.02	-1208.74	-607.91
TOA-B4	673.74654	94.85	7.26	502.37	874.97	443.53	933.81
TOA-B7	23.130538	16.98	1.17	-13.43	53.28	-23.97	63.81

Además, en la Tabla 13 están los valores de los coeficientes estadísticos que sirven para la validación del modelo estadístico, cuyos valores están en los rangos de los aceptados para este tipo de investigación.

Tabla 14. Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple de Landsat 8

Estadísticas del modelo de regresión lineal múltiple	
Coeficiente de correlación múltiple	0.7267
Coeficiente de determinación R^2	0.5281
R^2 ajustado	0.4691
Error residual estándar en 4 grados de libertad.	10.7640

3.3. Mapa de estimación de concentración de ozono troposférico.

Para realizar el mapa de estimación de concentración de ozono troposférico se puede utilizar los modelos de Landsat 7 o Landsat 8 lo cual está en función de la disponibilidad de imágenes satelitales claras y cercanas a los meses de muestreo, que fueron realizados durante los meses de abril, mayo y junio.

Estadísticamente con Landsat 7 se obtienen resultados de mayor confianza, pero en este caso se utilizó el modelo seleccionado para Landsat 8, debido a que no se cuenta con imágenes Landsat 7 claras y cercanas a la fecha de los muestreos.

Se optó aplicar el modelo para Landsat 8, para el cual se eligió la mejor imagen con el área de estudio despejada, obteniendo como producto un mapa de estimación de ozono troposférico, fue seleccionada la imagen Landsat 8 del 20 de noviembre de 2016, ésta es la imagen sin presencia de nubes del área de estudio y con la fecha más cercana a las fechas de monitoreo, no se pudo aplicar para imágenes Landsat 8 del año 2017 ya que todas las imágenes disponibles se encuentran con presencia de nubes del área de estudio, por lo tanto estas fueron descartadas para esta investigación.

En la Ilustración 5 se muestra la aplicación del modelo de regresión lineal múltiple para la cuantificación de ozono troposférico a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y 8, cuyos valores registran máximos de $104.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozono troposférico, lo cual supera el límite de la normativa ecuatoriana que establece un máximo de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para una exposición de 8 horas consecutivas, evidenciándose una menor concentración de este contaminante en los valles debido a que tienen menor exposición a radiación UV, las mayores concentraciones se registran en cumbres de grandes elevaciones como el cerro de Burines, Tres Cruces y Arquitectos.

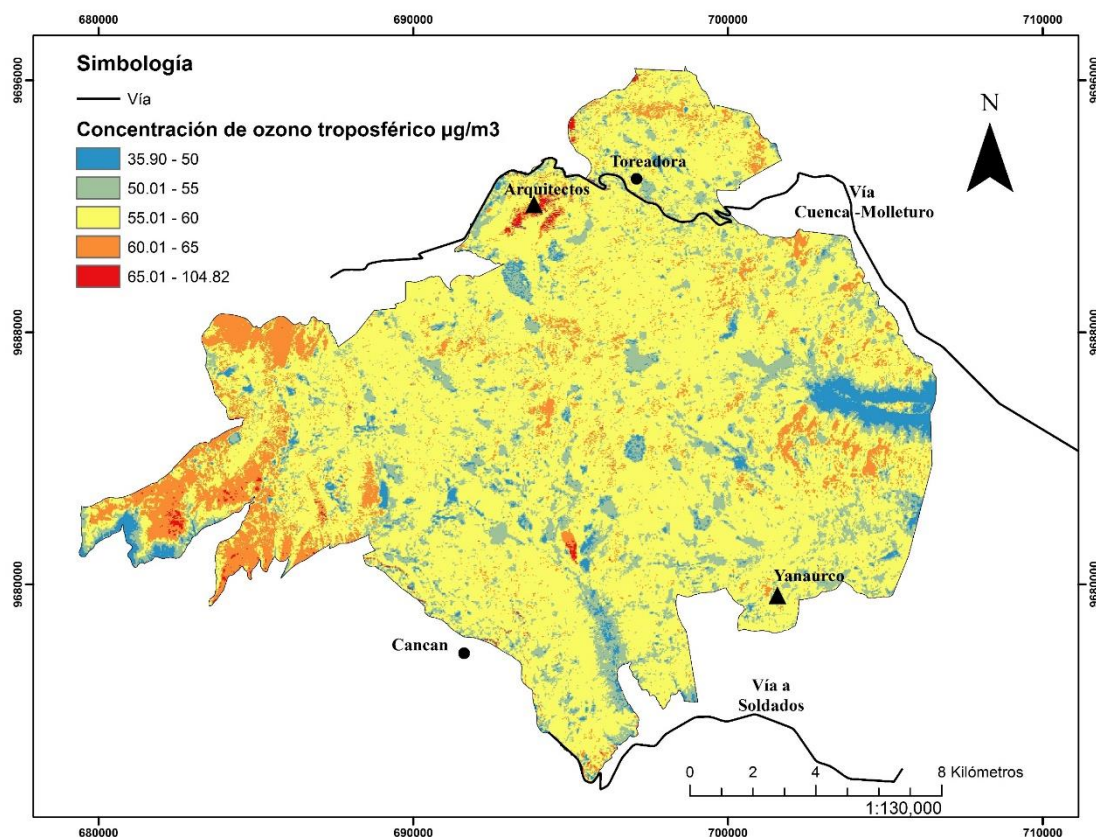


Ilustración 5. Aplicación del modelo estadístico de Landsat 8 para la estimación de concentración de ozono troposférico del 20 de noviembre de 2016

3.4. Resultados del análisis espectrométrico.

Al aplicar la metodología propuesta en esta investigación se realizó la toma de muestras de la especie *Polylepis reticulata*, logrando un equivalente de 31 muestras de 31 bosques distintos de la especie en estudio.

Una vez recolectados los datos y realizado la respectiva medición de la clorofila mediante la metodología espectrométrica, los resultados se muestran en la Tabla 15, en la que se registraron las absorbancias a 665nm con valores máximos de 2.771 y valores mínimos de 1.630, en cuanto a los valores de absorbancia a 649nm se registraron valores máximos de 2.611 y valores mínimos de 0.826, con todos los datos de absorbancias se pudo realizar los respectivos cálculos de clorofila *a* y *b*, por lo que se obtuvieron valores de clorofila *a* máximos de 2.53 µg Chl *a*/ml y mínimos de 1.76 µg Chl *a*/ml y valores de clorofila *b* máximos de 136.18 µg Chl *b*/ml y mínimos de 26.40 µg Chl *b*/ml.

Tabla 15. Resultados de los análisis espectrométricos realizados a la clorofila de *Polylepis reticulata*

Número de muestra	Absorbancia 665 nm	Absorbancia 649 nm	µg Chl a / ml solución	µg Chl b / ml solución
1	2.757	2.474	2.352	133.743
2	2.382	1.272	2.531	59.410
3	2.638	2.158	2.371	111.625
4	2.632	2.132	2.378	110.029
5	2.656	2.081	2.440	108.376
6	2.771	2.231	2.511	121.219
7	2.683	2.223	2.395	116.948
8	2.543	1.762	2.469	87.859
9	2.443	1.504	2.481	72.045
10	1.924	1.082	2.013	40.819
11	1.814	0.914	1.959	32.510
12	1.822	0.969	1.938	34.618
13	1.914	1.056	2.014	39.631
14	2.183	1.296	2.244	55.474
15	1.850	0.986	1.967	35.767
16	2.261	1.430	2.274	63.397
17	2.004	1.098	2.113	43.145
18	2.486	1.968	2.272	95.931
19	2.237	1.381	2.269	60.575
20	2.472	1.971	2.251	95.536
21	1.790	1.032	1.858	36.221
22	1.630	0.826	1.757	26.400
23	2.283	1.452	2.291	64.999
24	1.896	0.997	2.023	37.065
25	2.479	1.947	2.275	94.640
26	2.278	1.424	2.301	63.606
27	2.128	1.255	2.192	52.366
28	2.239	1.385	2.270	60.805
29	2.626	2.346	2.246	120.797
30	2.560	2.278	2.195	114.348
31	2.660	2.611	2.140	136.183

El análisis a una absorbancia de 254 nm para el ozono en la clorofila da como resultados valores máximos de concentraciones de 0.001608 mol/l y valores mínimos de 0.001285 mol/l, también se realizó la cuantificación de clorofila total por cada miligramo de peso seco, cuyas concentraciones máximas fueron de 0.1235 µg Chl/mg y valores mínimos de 0.01421 µg Chl/mg, todos estos resultados se muestran en la Tabla 16 .

Tabla 16. Resultados de las concentraciones de ozono en la clorofila y clorofila total por mg de peso seco.

Número de muestra	Absorbancia 254 nm	Concentración O ₃ (mol/L)	µg Chl/mg
1	4.650	0.001603448	0.064499841
2	4.654	0.001604828	0.078406362
3	4.130	0.001424138	0.118745368
4	4.656	0.001605517	0.123523747
5	4.652	0.001604138	0.057121725
6	4.654	0.001604897	0.094450267
7	4.651	0.001603793	0.097822486
8	3.878	0.001337241	0.111515874
9	4.339	0.001496207	0.088721109
10	4.662	0.001607586	0.045736204
11	4.665	0.001608621	0.029173679
12	3.995	0.001377586	0.033118566
13	4.662	0.001607586	0.049607266
14	4.660	0.001606897	0.073724026
15	4.088	0.001409655	0.050204253
16	3.882	0.001338621	0.039558499
17	4.662	0.001607586	0.026851568
18	4.660	0.001606897	0.106430446
19	4.118	0.001420000	0.078821234
20	4.444	0.001532414	0.051581199
21	4.410	0.001520690	0.059554792
22	4.658	0.001606207	0.014211449
23	4.660	0.001606897	0.030096713
24	4.261	0.001469310	0.055952599
25	3.729	0.001285862	0.061509892
26	4.654	0.001604828	0.051409109
27	4.652	0.001604138	0.039386651
28	4.656	0.001605517	0.046930336
29	3.925	0.001353448	0.110869788
30	4.655	0.001605172	0.091700884
31	4.650	0.001603448	0.071469940

3.5. Enfermedades observadas en el monitoreo del *Polylepis reticulata*.

Las enfermedades observadas en la especie de *Polylepis reticulata* corresponden principalmente a necrosis y clorosis, la necrosis es una enfermedad caracterizada por la mortalidad celular, lo que conduce a la muerte prematura de las hojas, aparece en forma de manchas acuosas oscuras en las hojas que pueden ser color oro oscuro o negros (Hernández y Zérega, 2000) .

Las variables que inciden directamente para el desarrollo de esta enfermedad son el clima, la calidad y disponibilidad del agua, calidad del aire, actividad biológica o la ausencia de nutrientes (Vega, 2015).

Esta enfermedad se encuentra representada en la Ilustración 6, la cual está presente en 20 muestras (Anexo 19) de los árboles monitoreados.



Ilustración 6. Necrosis presente en *Polylepis reticulata* de la muestra 9

La clorosis es otra de las enfermedades encontradas en el monitoreo.

El tejido verde de las hojas se torna a colores verde pálido, amarillo o blanqueado, que es el resultado de la baja producción de clorofila debido a infecciones virulentas, falta de minerales, presencia de agentes oxidantes como el ozono (Ramos et al., 2013).

Esta enfermedad está representada en la Ilustración 7, cuya presencia es muy recurrente en 14 muestras (Anexo 19) de los árboles monitoreados.



Ilustración 7. Clorosis registrada en la muestra 13

También se registraron la mortandad de algunos parches de bosques o el deterioro en la salud de algunos parches de bosques, principalmente se evidencia la pérdida de la cobertura foliar, como se muestran en la Ilustración 8 y la Ilustración 9.



Ilustración 8. Pérdida de cobertura foliar de la especie *Polylepis reticulata* registrada en la muestra 16



Ilustración 9. Muerte de individuos de la especie *Polylepis reticulata* registradas en la muestra 10

3.6. Correlación del ozono troposférico con variables meteorológicas y variables fisiológicas del *Polylepis reticulata*.

Los datos obtenidos tanto en el monitoreo como los datos de la estimación del ozono troposférico obtenidos a partir de la aplicación del modelo estadístico fueron correlacionados mediante la aplicación del coeficiente de Pearson, cuyos resultados se muestra en la Tabla 17, en la cual se aprecia que la clorofila y el ozono troposférico tienen un coeficiente de Pearson de -0.52, con lo cual se considera de que posee una correlación negativa media, es decir existe una proporcionalidad inversa, en cuanto a las concentraciones de ozono en la clorofila con el ozono troposférico presenta un valor de $R^2 = 0.01$, con lo cual no existe correlación lineal alguna entre estas variables, la altura y ozono troposférico posee un $R^2 = 0.58$, la precipitación y ozono troposférico presentan un $R^2 = 0.58$, con lo cual establece una proporcionalidad entre estas variables y el ozono troposférico.

Tabla 17: Coeficiente de Pearson del ozono troposférico con variables meteorológicas y variables fisiológicas de la especie *Polylepis reticulata*

Variables	O ₃ [μ/m ³]	Temperatura [°C]	Precipitación [mm]	Radiación [W/m ²]	Presión [hPa]	Humedad Relativa [%]	Altura [m]	Copa [m]	Altura del árbol [m]	DAP [m]	μg Chl a / ml	μg Chl b / ml	Concentración de O ₃ (mol/L) en clorofila	μg Chl/mg
O ₃ [μ/m ³]	1													
Temperatura [°C]	-0.60	1												
Precipitación [mm]	0.58	-0.95	1											
Radiación [W/m ²]	-0.63	0.45	-0.39	1										
Presión [hPa]	-0.47	0.97	-0.92	0.21	1									
Humedad Relativa [%]	0.30	0.15	-0.18	-0.81	0.40	1								
Altura	0.58	-0.63	0.58	-0.66	-0.49	0.33	1							
Copa [m]	0.36	-0.14	0.21	-0.30	-0.05	0.25	0.37	1						
Altura del árbol [m]	0.15	0.13	-0.04	-0.13	0.19	0.24	0.11	0.82	1					
DAP [m]	0.17	0.03	0.05	-0.16	0.13	0.25	0.19	0.62	0.66	1				
μg Chl a / ml solución	-0.42	0.65	-0.64	0.31	0.60	0.06	-0.45	-0.11	0.13	-0.24	1			
μg Chl b / ml solución	-0.60	0.56	-0.59	0.63	0.42	-0.36	-0.46	-0.29	-0.05	-0.31	0.65	1		
Concentración O ₃ (mol/L) en clorofila	0.01	0.05	0.02	0.15	0.00	-0.14	0.01	-0.05	0.00	-0.05	-0.01	0.01	1	
μg Chl/mg	-0.52	0.61	-0.65	0.49	0.51	-0.17	-0.66	-0.25	0.00	-0.11	0.62	0.68	-0.17	1

4. Discusiones

Las variables de crecimiento como la altura del árbol y ancho de copa poseen un R^2 de 0.82, la altura del árbol y DAP presenta un R^2 de 0.66, el DAP y el ancho de la copa tienen un R^2 de 0.62 por lo que poseen una correlación positiva media (una variable expresa un cambio en otra variable), debido a que las especies de árboles presentan un ritmo de crecimiento y aumento de masa forestal proporcional en las variables epidométricas (Delgado, Acevedo, Castellanos, Ramírez, y Serrano, 2005).

Las variables fisiológicas de *Polylepis reticulata* estudiadas como la clorofila *a* y la clorofila *b*, presentan un R^2 de 0.65, es decir poseen una correlación positiva media con lo cual se atribuye un efecto débil y no influyente en cambios fisiológicos, manteniéndose esta tendencia en otras especies de la misma familia como *Polylepis sericea* que presenta una relación directa en la distribución y actividad metabólica con la topografía y temperatura (Cavieres y Piper, 2004).

La clorofila *a* y clorofila *b* presentan un R^2 de 0.65 y 0.56 respectivamente con relación a la temperatura, es decir presenta un aumento en la actividad metabólica y fotosintética cuando hay un aumento de temperatura, estudios realizados con *Lycopersicon esculentum* muestran similar comportamiento de correlación con un R^2 de 0.73 y 0.69 respectivamente (Morales, Rodríguez, Dell'Amico, Torrecillas, y Sánchez, 2006).

El aumento de temperatura incide positivamente en el intercambio gaseoso de las hojas (Cadena, Ruiz, Trejo, Sánchez, y Aguirre, 2001).

La precipitación presenta un R^2 de -0.54 y -0.59 para la clorofila *a* y clorofila *b* respectivamente, estas correlaciones medias negativas de acuerdo a un estudio en la especie *Vanilla planifolia* se dan debido a que la precipitación es un factor que controla la apertura o cierre de los estomas, disminuyendo la actividad fotosintética (Reyes-López et al., 2015). Además en la región andina la presencia de precipitación viene acompañado con una disminución en la temperatura (Rozzi, Miranda, y Molina, 1989), lo cual corrobora la correlación negativa fuerte entre estas dos variables con un R^2 de -0.95.

La presión y la clorofila *a*, presentan una correlación positiva débil ($R^2=0.60$), lo cual representa un aumento de actividad fotosintética cuando existe un aumento de presión atmosférica debido a que el intercambio gaseoso se da mejor en condiciones de 1 atm, una disminución de la presión atmosférica disminuye el intercambio gaseoso de las hojas (Gil, Aranda, Peguero, y Vilagrosa, 2005).

La clorofila *b* y clorofila total presenta un R^2 de -0.60 y -0.52 respectivamente, lo cual representa una correlación negativa media respecto a las concentraciones de ozono

troposférico, es decir son variables indirectamente proporcionales, lo que lleva a una disminución de la eficiencia fotosintética de las hojas, disminuyendo notoriamente funciones como el crecimiento (Carrasco-Ríos, 2009). Un aumento de ozono evidentemente conlleva a un estrés oxidativo provocando una reducción en la concentración de pigmentos fotosintéticos y en la disminución de la eficiencia fotosintética, limitando la asimilación de carbono por el cierre estomático (Garay, Guerrero, Omeñaca, y Vega, 2012).

La posible disminución de clorofila representa un bajo rendimiento fotosintético, con lo cual puede estar acompañado en la deficiencia de asimilación de hierro y causar desequilibrios nutricionales (Catalina, 2015). La incidencia del ozono troposférico sobre el rendimiento fotosintético representa susceptibilidad fitopatológica (Leos, Rivas, y Garcia, 2016), por lo que las hojas de *Polylepis reticulata* pueden estar en riesgo ante el aumento en las concentraciones de ozono troposférico.

La presencia de clorosis y necrosis en varias muestras...ver Anexo 19... concuerdan con las bajas concentraciones de clorofila, que de acuerdo a un estudio realizado en *Phaseolus vulgaris*, la presencia de clorosis y necrosis en las hojas disminuye la concentración de pigmentos fotosintéticos y representan un aumento en la recurrencia de estas enfermedades (Barcelo, Gunse, y Poschenrieder, 1986).

La clorosis también se puede atribuir a otras causas como el consumo en altas concentraciones de nitrógeno del medio (Ochoa y García, 2010). La necrosis en especies de *Polylepis cuadrijuga* está relacionada a agentes oxidantes, bacterianos y fúngicos (Vega, 2015), por lo que en esta investigación la relación de la clorofila y el ozono troposférico es indirectamente proporcional y la relación de la concentración de ozono en clorofila con las variables fisiológicas medidas son nulas.

Los modelos generados tanto para imágenes Landsat 7 y Landsat 8 utiliza combinaciones de la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) de las bandas multiespectrales, estos modelos fueron creados a partir de la generación de regresiones lineales múltiples, cuyos resultados reflejan las concentraciones de ozono troposférico, su validez está representada en los coeficientes de determinación cuyos valores son de 0.6979 para Landsat 7 y de 0.5281 para Landsat 8, ya que en otras investigaciones se validan modelos estadísticos con un R^2 de 0.48 (Wimberly y Reilly, 2007) y 0.77 (Couper et al., 2007), por lo que de acuerdo a las fuentes citadas son aceptables.

5. Conclusiones

Cada uno de los mapas generados están ajustados a las condiciones del área de estudio, registrando las mayores concentraciones de ozono troposférico en sitios de mayor altura y las menores concentraciones en lugares de menor altitud.

La información liberada por los satélites Landsat 7 y Landsat 8 de la NASA constituye un aporte significativo hacia la investigación científica, y su utilización tiene infinitas aplicaciones, entre las cuales destaca la estimación de gases de efecto invernadero como lo es el ozono troposférico. Por otra parte, la EMOV-EP también brinda un servicio muy significativo a través de su sistema de monitoreo de la calidad del aire, tanto en el área urbana como en el área rural de la ciudad de Cuenca, específicamente en el Parque Nacional Cajas, debido a la gran importancia ecosistémica que el mismo posee; además de la apertura que presenta la empresa hacia la obtención de la información que posee permitiendo un mayor desarrollo investigativo la respectiva generación de conocimiento. Un defecto del monitoreo del ozono troposférico por parte de la EMOV-EP son los limitados puntos de mediciones y su distribución espacial dentro del Parque Nacional Cajas, está concentrado en la parte Norte, tomando como prioridad la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal, lo cual se asume es debido a la facilidad de acceso que tiene esta zona.

Las enfermedades planteadas por la literatura como la clorosis o necrosis que son propias de la acción oxidativa del ozono troposférico, por ejemplo el caso del algodón (*Gossypium barbadense*) (Jarma, Cardona, y Araméndiz, 2012), en el cual se presentan una mayor recurrencia de estas enfermedades conforme aumentan las concentraciones de ozono del aire ambiente, el ozono troposférico puede estar afectando la especie *Polylepis reticulata*, pero es necesario recurrir a nuevos indicadores fisiológicos y fenológicos para establecer la incidencia de este gas sobre esta población.

Los resultados de este estudio han demostrado que el aumento de ozono troposférico disminuye las concentraciones de clorofila *a* y clorofila *b* de las hojas de *Polylepis reticulata*, reduciendo la eficiencia fotosintética y por ende disminuyendo el crecimiento y desarrollo vegetal.

El ozono presente en la clorofila no presenta correlación alguna con las variables fisiológicas como clorofila *a* y clorofila *b*, por lo que esta variable no presenta correlación alguna con *Polylepis reticulata*.

En definitiva, se ha logrado demostrar que la acción oxidativa del ozono presente en clorofila no representa directamente peligro alguno en el *Polylepis reticulata*. El ozono

troposférico influye indirectamente en la eficiencia fotosintética, debido a que un aumento de O_3 representa una disminución de las concentraciones de los pigmentos fotosintéticos. También un logro importante es el establecimiento de una manera rápida de estimar las concentraciones de ozono troposférico a través de imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8 con la aplicación de modelos de regresión lineal múltiple.

Las concentraciones de ozono troposférico presentan una correlación positiva débil con la altitud de la zona de estudio y las variables fisiológicas como clorofila *a* y clorofila *b* presentan una correlación negativa débil, por lo que este gas puede ser una variable que afecte al *Polylepis reticulata*, por lo tanto es necesario un estudio fenológico más detallado para descartar o reconocer la incidencia de las enfermedades observadas en este estudio con el aumento de las concentraciones de ozono troposférico.

5.1. Limitaciones

- La principal limitación presentada en la investigación fue la poca colaboración de instituciones que monitorean variables climatológicas, debido a que en algunos casos la liberación de información se restringe por seguridad interna y convenios con la Universidad de Cuenca, por lo que se opta por descartar los datos provenientes de estas instituciones.
- Otra restricción que se presenta son las imágenes satelitales Landsat 7 debido a las franjas que presenta, por lo que es necesario realizar interpolaciones para rellenar datos faltantes, o en otros casos trabajar con la ausencia de los datos en las franjas, además de la presencia de nubosidad en la zona de estudio, tanto en Landsat 7 como Landsat 8, por lo que el seleccionar la mejor imagen y en lo posible sin presencia de nubes garantiza de que los datos generados a partir del modelo creado sean representativos.
- Los pocos años de monitoreo de este gas en el Parque Nacional Cajas constituye un gran desafío para la investigación, por lo que la cantidad de datos limita a la validación de los modelos generados.

5.2. Recomendaciones

- A partir de la investigación realizada se pudo observar que, efectivamente, existe presencia de necrosis y clorosis dentro de los individuos de la población de *Polylepis reticulata* muestreados, partiendo de este hecho, lo más recomendable realizar estudios que permitan definir la correlación existente entre estas enfermedades y las variables fenológicas de la especie con la finalidad de establecer las acciones específicas pertinentes que permitan reducir su estado de amenaza así como la vulnerabilidad de la misma.

Se recomienda analizar factores nutricionales, variables fenológicas, y patrones de distribución de *Polylepis reticulata*, para conocer su comportamiento y respuesta ante los efectos del calentamiento global y emprender medidas de educación y protección en la población sobre la importancia de los páramos andinos.

Otra recomendación se enfoca en la continuidad que se le debería dar a la investigación enfocándose en la teledetección teniendo muy presente la realización de estudios en vivo con individuos de la especie garantizando la veracidad de los datos obtenidos de ambos francos para así, garantizar la adecuada gestión de los recursos que son dirigidos hacia la conservación de especies forestales en riesgo.

Finalmente se recomienda que se dé continuidad a investigaciones fenológicas ligadas a especies de flora representativas de los páramos ecuatorianos como: la chuquirahua (*Chuquiraga jussieui*) o el aguarongo (*Puya Hamata*) y, en función de los resultados de las investigaciones, tomar las respectivas acciones.

5.3. Futuras investigaciones

La investigación de otros factores climáticos, químicos o biológicos que puedan incidir en el deterioro fisiológico de la especie *Polylepis reticulata* debería analizar soluciones técnicas y científicas para proteger esta especie, con el fin de evitar que una especie tan representativa del Parque Nacional Cajas con el tiempo desaparezca y cause graves daños ecológicos.

Un estudio minucioso de factores como virus, bacterias y nematodos en condiciones controladas de laboratorio y nutrientes in-situ se lo debería realizar como prioridad, puesto que la concentración del ozono troposférico en el aire ambiente representa una disminución de la eficiencia fotosintética y, las enfermedades observadas, presentadas dentro de los resultados de este estudio como la necrosis y clorosis, también obedecen a desórdenes nutricionales o presencia de especies parásitas, como por ejemplo hongos. Partiendo de esta premisa, es que la investigación deja abierta la posibilidad de indagar dentro de los factores mencionados (hongos, bacterias, virus, nutrición y otros gases) ya que, a través de la presente investigación se descarta que dichas enfermedades sean un efecto directo de la presencia de ozono troposférico en el ambiente.

Es necesario tener en consideración la investigación de otros modelos estadísticos con sensores remotos diferentes que permitan corroborar los resultados del presente estudio con el fin de aumentar el nivel de significancia de los datos generados, e inclusive, determinar la posibilidad de aplicar la metodología expuesta a otros contaminantes.

Referencias

- Alonso, J. A. (2013). El Planeta Tierra en peligro: Calentamiento Global y Cambio Climático (pp 53-55). Recuperado a partir de <https://books.google.com.ec/books?id=A6vXg35c8LIC>
- Altieri, M. A., y Nicholls, C. I. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 24(4), 13-22.
- Amend, S. (1995). *Espacios sin habitantes? Parques nacionales de América del Sur* National parks without people? The South American experience. IUCN, Gland (Suiza) Parques Nacionales y Conservación Ambiental, Quito (Ecuador).
- Archila, L. G. R., y González, A. M. C. (2014). CARBON CAPTURE IN THREE FOREST SPECIES IN META DEPARTMENT. *REVISTA CIENTÍFICA GUARRACUCO*, (18).
- Barcelo, J., Gunse, B., y Poschenrieder, C. (1986). Chlorophyll and carotenoid contents of *Phaseolus vulgaris* L. in relation to mineral nutrition disorders induced by chromium VI supply. *Photosynthetica*, 20(3), 249–255.
- Barsi, J., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B., y Pedelty, J. (2014). The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing*, 6(10), 10232-10251. doi:10.3390/rs61010232
- Caceres, R. (2007). Movimiento limite de los bosques de *Polylepis* en relación al retroceso glaciar en la microcuenca Quillcay-Ancash.
- Cadena, J., Ruiz, L. M., Trejo, C., Sánchez, P., y Aguirre, J. (2001). *REGULACIÓN DEL INTERCAMBIO DE GASES Y RELACIONES HÍDRICAS EN CHAYOTE (Sesuvium edule (Jacq.) Swartz)*. (Vol. VII). doi:10.5154/r.rchsh.2000.11.079
- Camredon, M., y Aumont, B. (2007). I–L'ozone troposphérique: production/consommation et régimes chimiques. 2268-3798.
- Carrasco-Ríos, L. (2009). EFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA-B EN PLANTAS. *Idesia (Arica)*, 27(3), 59-76. doi:10.4067/S0718-34292009000300009

- Castro, A., y Flores, M. (2015). Caracterización de un bosque de queñual (*Polylepis* spp.) ubicado en el Distrito de Huasta, Provincia de Bolognesi (Ancash, Perú). *Ecología Aplicada*, 14(1), 1-9.
- Catalina, Á. (2015). Utilización de medidas de fluorescencia de la clorofila para monitorizar el estado nutricional y estimar el potencial enológico en viñedos afectados por clorosis férrica. Recuperado a partir de <http://uvadoc.uva.es:80/handle/10324/16657>
- Cavieres, L. A., y Piper, F. I. (2004). Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. En: *HM Cabrera (ed.), Fisiología ecológica en plantas*, 221–234.
- Chirico, N., y Gramatica, P. (2011). Real External Predictivity of QSAR Models: How To Evaluate It? Comparison of Different Validation Criteria and Proposal of Using the Concordance Correlation Coefficient. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 51(9), 2320-2335. doi:10.1021/ci200211n
- Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P., Céleri, R., Feyen, J., y Breuer, L. (2016). Continuous versus event-based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes*, 30(22), 4059-4073. doi:10.1002/hyp.10975
- Couper, M. P., Kapteyn, A., Schonlau, M., y Winter, J. (2007). Noncoverage and nonresponse in an Internet survey. *Social Science Research*, 36(1), 131-148. doi:10.1016/j.ssresearch.2005.10.002
- Daniel, W. W., y Cross, C. L. (1995). Biostatistics: a foundation for analysis in the health sciences.
- Delgado, L. A., Acevedo, M. F., Castellanos, H., Ramírez, H., y Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de arboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 30(5), 275-283.
- Díaz, N. A., Ruiz, J. A. B., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P., Meléndez-Valdés, F. T., et al. (2000). 8. Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. *Universidad de Córdoba.[En línea] España.[Fecha de acceso: 15 de mayo de 2014] Disponible en URL:*

[http://www. uco. es/dptos/bioquimica-biolmol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETR% C3% 8DA. pdf.](http://www.emov.gob.ec/dptos/bioquimica-biolmol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf)

EMOV. (2012). *Informe de la Calidad del Aire del Parque Nacional Cajas 2011*. Cuenca, Ecuador: EMOV EP.

EMOV. (2013). *Informe de la Calidad del Aire del Parque Nacional Cajas 2012*. Cuenca, Ecuador: EMOV EP.

EMOV. (2014). *Informe de la Calidad del Aire del Parque Nacional Cajas 2013*. Cuenca, Ecuador: EMOV EP.

EMOV. (2015). *Informe de la Calidad del Aire del Parque Nacional Cajas 2014*. Cuenca, Ecuador: EMOV EP.

EMOV. (2016). INFORME DE CALIDAD DEL AIRE 2015 | EMOV EP. Recuperado agosto 15, 2017, a partir de <http://www.emov.gob.ec/?q=content/informe-de-calidad-del-aire-2015-1>

Espejo, B., y Gutiérrez, E. (2013). Ozono troposférico | Ecologistas en Acción. *Ecologistas en acción*. Recuperado noviembre 15, 2016, a partir de <http://www.ecologistasenaccion.org/article27108.html>

Fann, N., Nolte, C. G., Dolwick, P., Spero, T. L., Brown, A. C., Phillips, S., y Anenberg, S. (2014). The geographic distribution and economic value of climate change-related ozone health impacts in the United States in 2030. *Journal of the Air & Waste Management Association*. Recuperado a partir de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10962247.2014.996270>

Faraldos, M., y Goberna, C. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Gamarra, C., y Elis, L. (2016). Evolución temporal de concentración de ozono en la troposfera. *Repositorio de Tesis - UNMSM*. Recuperado a partir de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/5042>

Garay, A. G., Guerrero, C. C., Omeñaca, J. A. S. de, y Vega, J. A. M. de la. (2012). Efectos sobre la fotosíntesis por exposición a ozono en especies leñosas. *REDUCA*

- (*Biología*), 5(2). Recuperado a partir de <http://www.revistareduca.es/index.php/biologia/article/view/941>
- Garduño, R. (2004). ¿Qué es el efecto invernadero? *Cambio climático: una visión desde México*, 29.
- Geocentro. (2017). Satélite de imágenes LANDSAT-7. *Geocento Spain proveedor online de imágenes de satélites*. Recuperado a partir de <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-7/>
- Gil, E., Aranda, I., Peguero, J., y Vilagrosa, A. (2005). El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Invest Agrar: Sist Recur For*, 14(3), 358–370.
- Gutiérrez, C. P. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*.
- Hernández, J., y Zérega, L. (2000). Necrosis del ápice y del borde de las hojas y retraso en el crecimiento de la caña de azúcar (*Saccharum* sp. híbrido) en el Bajo Yaracuy, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17(3).
- IDEAM. (2017). OZONO TROPOSFÉRICO - IDEAM. *Ministerio del Ambiente de Colombia*. Recuperado agosto 2, 2017, a partir de <http://www.meteoaeronautica.gov.co/ozono-troposferico>
- Jara, S., y Torres, G. (2016). Actividad vegetativa, tasas de crecimiento y estimación de la edad de los individuos en los rodales de *polylepis reticulata* del Parque Nacional Cajas. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23921>
- Jarma, A., Cardona, C., y Araméndiz, H. (2012). EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE PHYSIOLOGY OF CROP PLANTS: A REVIEW. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76.
- Kirchner, B. G. (2009). Ozono troposférico. Recuperado a partir de <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-ozono-troposferico.html>
- Kloiber, S. M., Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., y Bauer, M. E. (2002). A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 82(1), 38-47. doi:10.1016/S0034-4257(02)00022-6

- Knudson, L. L., y Tibbitts, T. W. (1977). Measurement of Ozone Injury by Determination of Leaf Chlorophyll Concentration 1. *Plant Physiology*, 60(4), 606-608.
- Lacasaña, M., y Aguilar, C. (1999). Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Salud Pública de México*, 41(3), 203-215.
- Leos, C., Rivas, C., y Garcia, D. G. (2016). Actividad antioxidante y toxicidad. *OmniaScience Monographs*, 0(0). doi:10.3926/oms.333
- Llumiangua, A., y Cristina, M. (2008). Desarrollo de procedimientos para la validación de métodos de análisis de metales en agua por espectrometría de absorción atómica. Recuperado a partir de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/806>
- López, M., Montero, J., Atanasio, J. M., y Cansado, A. (2011). Pérdida record de ozono estratosférico en el ártico durante la primavera de 2011: implicaciones sobre España.
- Luque Jiménez, A. (2004). Aplicación de la teoría de sistemas dinámicos al estudio cualitativo y cuantitativo de la evolución del ozono estratosférico y troposférico. Recuperado a partir de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3161>
- Madruga, D. G., Patier, R. F., Ramiro, E. D., y Garraleta, M. D. (2001). Estudio de las concentraciones de ozono superficial en la atmósfera de la Comunidad de Madrid usando muestreadores pasivos. *Revista de Salud Ambiental*, 1(1), 20-29.
- Mallick, J., y Kant, Y. (2008). Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+. *J. Ind. Geophys. Union*, 12(3), 131-140.
- Mendoza, A. B., y Garbarino, M. C. C. (2016). El Régimen Internacional del Cambio Climático y los Retos para México.
- Ministerio del Ambiente. (2017). PARQUE NACIONAL CAJAS – Ministerio del Ambiente. Recuperado julio 10, 2017, a partir de <http://www.ambiente.gob.ec/parque-nacional-cajas/>
- Monge, S. (2015, septiembre). *Desarrollo del método para la cuantificación de la clorofila-a en muestras de agua, por espectroscopia ultravioleta visible*

- (bachelor). Universidad de El Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/8556/>
- Mora, S. D., y Serrano, M. I. (2017). *Propuesta de anteproyecto arquitectónico para la readecuación y refuncionalización de las edificaciones emplazadas en la zona Toreadora del parque nacional Cajas* (B.S. thesis).
- Morales, D., Rodríguez, P., Dell'Amico, J. A., Torrecillas, A., y Sánchez, M. de J. (2006). EFECTO DE ALTAS TEMPERATURAS EN ALGUNAS VARIABLES DEL CRECIMIENTO Y EL INTERCAMBIO GASEOSO EN PLANTAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. AMALIA). *Cultivos Tropicales*, 27(1). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=193215885008>
- Mostacedo, B., y Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) Santa Cruz, Bolivia.
- Muñoz, M., y Yáñez, J. (1996). Libro Rojo de los Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad en Chile. *Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile*.
- NASA. (2017). Landsat 8 Bands «Landsat Science. Recuperado a partir de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>
- Navarro-Comas, M., Yela, M., Ochoa, H., Gil, M., Parrondo, M., y Puenteadura, O. (2008). Ozono Superficial en la Base Antártica Belgrano. Surface ozone at Antarctic Station Belgrano.
- Ochoa, J., y García, M. (2010). Cinética de crecimiento y producción de pigmentos en función de la concentración de nitrato de sodio pH tasas de reposición e irradiancia en medios de cultivo BG11 seimocntiuos en la cianobacteria *Seytonema* sp Procedente del bosque de *Polylepis* pauta del parámo de Papallacta. Recuperado a partir de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/2609>
- Ospina, A., y Garrido, M. Á. (2013). Técnicas de medición de ozono. *Gestión y Ambiente; Vol. 16, núm. 2 (2013); 95-104 Gestión y Ambiente; Vol. 16, núm. 2 (2013); 95-*

- 104 2357-5905 0124-177X. Recuperado a partir de <http://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/39570>
- Pinos, J., Studholme, A., Carabajo, A., y Gracia, C. (2017). Leaf Litterfall and Decomposition of *Polylepis reticulata* in the Treeline of the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 37(1), 87-96. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00004.1
- Quispe, C., Astudillo, L., Villasenor, J., y Delgadillo, Á. (2010). Ozonización del antibiótico Trimetoprim: Evolución de la toxicidad durante la degradación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(2), 149-155.
- Ramos, C., Buitrago, S. P., Pulido, K. L., y Vanegas, L. J. (2013). Variabilidad ambiental y respuestas fisiológicas de *Polylepis cuadrijuga* (Rosaceae) en un ambiente fragmentado en el Páramo de la Rusia (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 61(1). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=44925650037>
- Reyes-López, D., Quiroz-Valentín, J., Kelso-Bucio, H. A., Huerta-Lara, M., Avendaño-Arrazate, C. H., y Lobato-Ortiz, R. (2015). Caracterización estomática de cinco especies del género *Vanilla*. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=43738993005>
- Rodríguez, C. M. A., Santana, R. C., Padrón, G. P., y Gómez, Y. M. (2015). Efectos del ozono troposférico sobre cultivos de ajo, *Allium sativum* y tabaco, *Nicotiana tabacum* en Cuba. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 1(2), 49-54.
- Rodríguez, M. (2012). Caracterización del crecimiento, calidad, y estudio de variables fisiológicas, en una plantación joven y un ensayo de procedencias de eucalyptus pellita f. Muell en el Estado de Tabasco, México.
- Rozzi, R., Miranda, P., y Molina, J. (1989). Mioroclima y periodos de floración en laderas de exposición ecuatorial y polar en los Andes de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 62, 75-84.
- Salinero, C. (2008). *Teledeteccion ambiental*. Grupo Planeta (GBS).

- Sanz González, J. (2017). Sensibilidad de especies pascícolas mediterráneas anuales al incremento de ozono troposférico: parámetros de respuesta y definición de niveles críticos.
- Saravia, G. E., y Vintimilla, D. C. (2016). *Actividad vegetativa, tasas de crecimiento y estimación de la edad de los individuos en los rodales de polylepis reticulata del Parque Nacional Cajas*.
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.
- Sosa, D. (2010, junio 25). *Validación de las técnicas analíticas y de los métodos de medida en el laboratorio para la cuantificación de dióxido de nitrógeno y ozono troposférico* (Thesis). Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas. Recuperado a partir de <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/462>
- Trinidad, H., y Cano, A. (2016). Composición florística de los bosques de Polylepis Yauyinazo y Chaqsii-Chaqsii, Reserva Paisajística Nor Yauyos-Cochas, Lima. *Revista Peruana de Biología*, 23(3), 271-286. doi:10.15381/rpb.v23i3.12862
- Triola, M. F. (2004). *Estadística*. Pearson Educación. Recuperado a partir de <https://books.google.com.ec/books?id=Lj5VlatlLhsC>
- Valenciaga, D., y Oliveira, E. (2006). La espectroscopia de reflectancia en el infrarojo cercano (NIRS) y sus potencialidades para la evaluación de forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(3). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=193017723001>
- Vega, C. (2015). Massive propagation of Polylepis tomentella Weddell ssp. nana through in vitro culture techniques. *Ecología en Bolivia-Revista del Instituto de Ecología*, 42(2).
- Velásquez, F., y Jiménez, S. (2017). La contaminación por ozono troposférico. El caso de Motril (Granada)/Pollution by tropospheric ozone. The case of Motril (Granada) - ProQuest. Recuperado agosto 15, 2017, a partir de <https://search.proquest.com/openview/b56703b232f0de58e7a6ca595b6fc61b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54846>

- Villota, S. D. (2012). *Evaluación de la dinámica poblacional en especies simpátricas de Polylepis en el Páramo de la Virgen, provincia de Napo y Pichincha mediante marcadores moleculares*. QUITO/PUCE/2012.
- Wimberly, M. C., y Reilly, M. J. (2007). Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 108(2), 189-197.
- Wu, C., Pullinen, I., Andres, S., Carriero, G., Fares, S., Hacker, L., Kiendler-Scharr, A., et al. (2015). The role of vegetation for tropospheric ozone balance: possible changes under future climate conditions (Vol. 17, p 10488). Presentado en EGU General Assembly Conference Abstracts. Recuperado a partir de <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..1710488W>
- YALE. (2017). How to convert Landsat DNs to Top of Atmosphere (ToA) Reflectance | Center for Earth Observation. yceo.yale.edu. Recuperado agosto 20, 2017, a partir de <http://yceo.yale.edu/how-convert-landsat-dns-top-atmosphere-toa-reflectance>
- Zutta, B. R., Rundel, P. W., Saatchi, S., Casana, J. D., Gauthier, P., Soto, A., Velazco, Y., et al. (2012). Prediciendo la distribución de Polylepis: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 205-212.

Anexos



Anexo 1. Extracción de clorofila de las hojas de *Polylepis reticulata*



Anexo 2. Extracción completa de la clorofila de *Polylepis reticulata*



Anexo 3. Análisis en el espectrómetro de las muestras



Anexo 4. Extracción diaria de la clorofila



Anexo 5. Secado de las muestras en la incubadora



Anexo 6. Recolección de muestras en el Parque Nacional Cajas

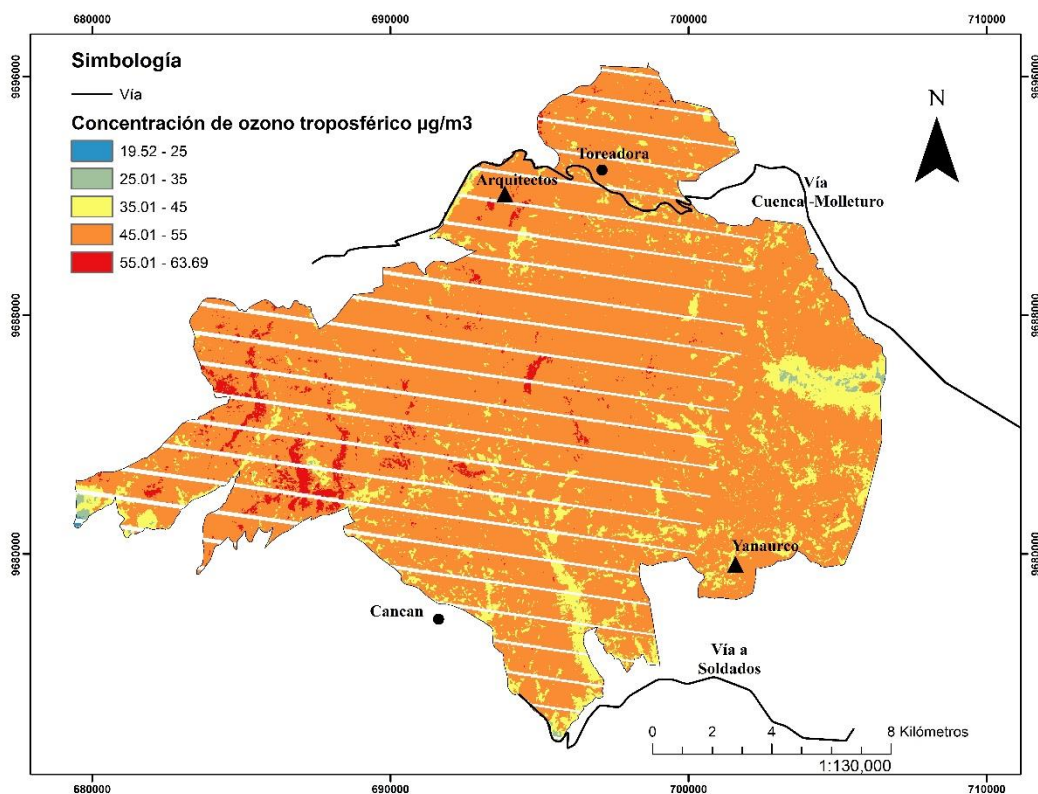


Anexo 7. Parches de bosques característicos de la zona de estudio

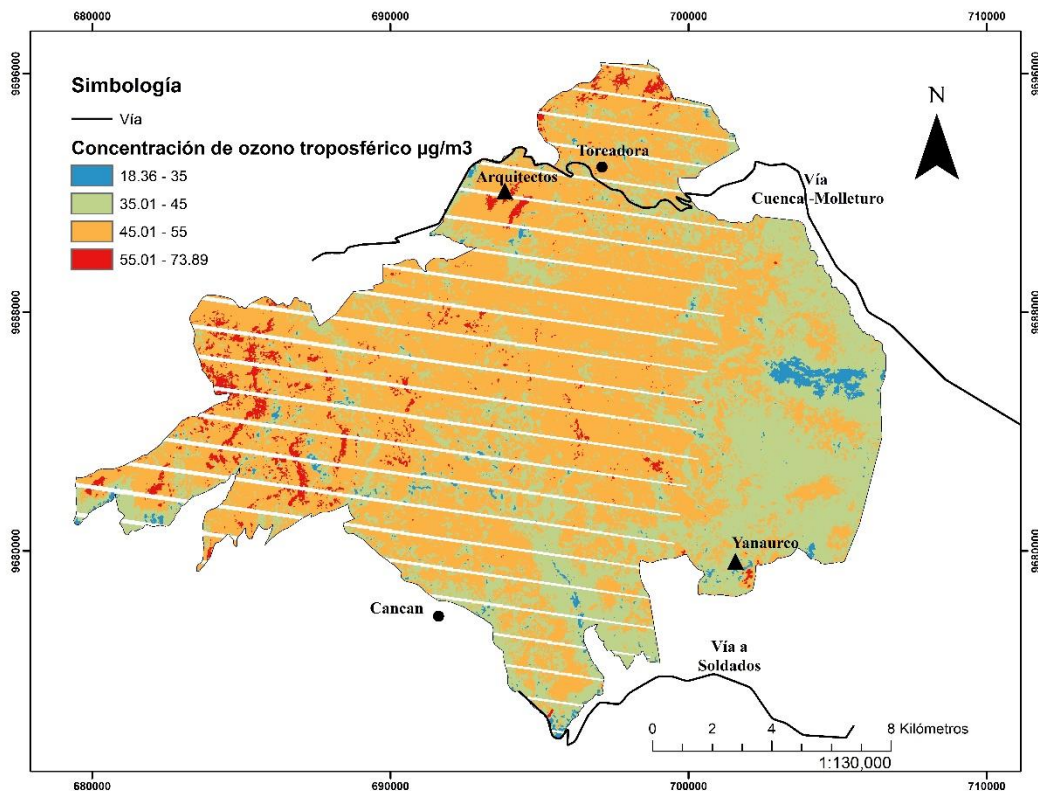


Número	COORDENADAS [WGS84]	
	x	y
1	697824.59	9678759.43
2	698159.65	9678231.49
3	695673.91	9681646.81
4	700439.66	9681405.52
5	699638.59	9682219.15
6	699590.85	9682805.41
7	699000.45	9682448.62
8	698660.38	9683146.77
9	689130.88	9682112.39
10	697450.06	9692241.61
11	697325.54	9692256.17
12	697219.34	9692623.47
13	697132.78	9692741.93
14	697099.73	9692946.56
15	697900.40	9692973.01
16	697821.82	9693218.63
17	698180.62	9692229.44
18	698416.35	9693697.68
19	699367.86	9692721.97
20	699516.00	9692886.52
21	700068.49	9692770.67
22	696190.01	9691330.24
23	695918.13	9692283.39
24	695482.14	9692839.32
25	696141.23	9691662.45
26	697384.45	9691603.12
27	698473.12	9691251.18
28	698613.20	9691293.01
29	700144.10	9688266.81
30	701328.11	9690868.80
31	701279.58	9690048.03

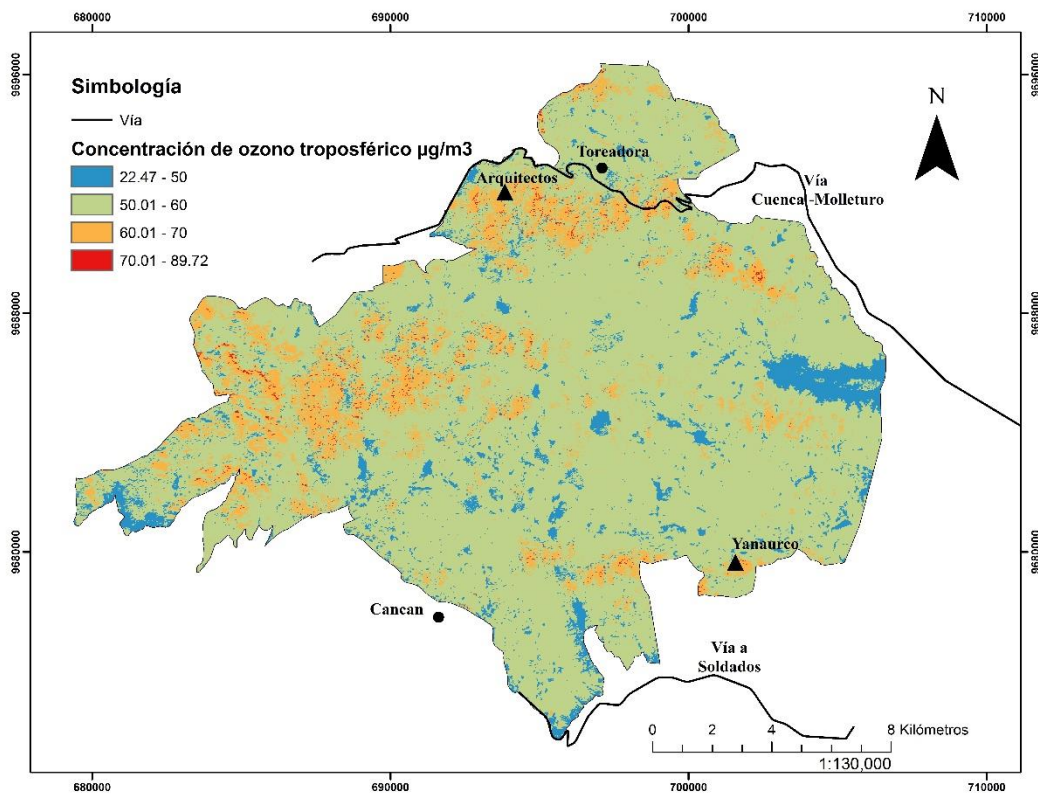
Anexo 8: Coordenadas de los puntos de muestreo



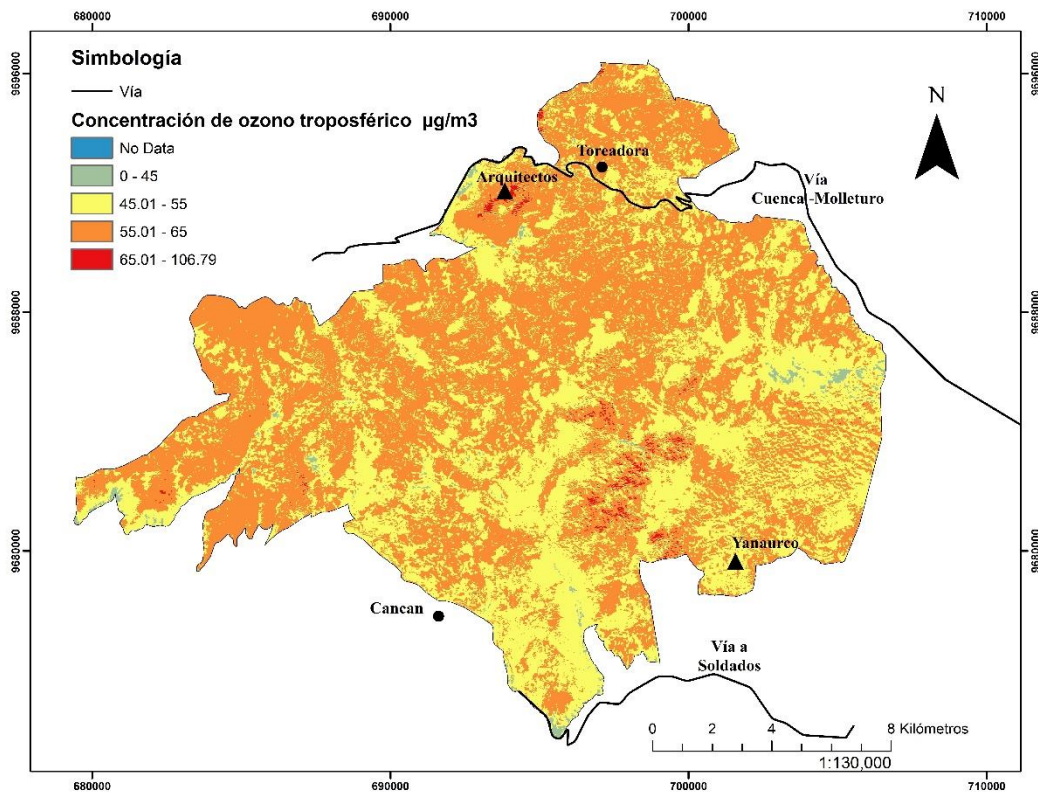
Anexo 9. Estimación de concentración de ozono troposférico del 28 de julio de 2011



Anexo 10. Estimación de concentración de ozono troposférico del 19 de diciembre de 2012



Anexo 11. Estimación de concentración de ozono troposférico del 4 de mayo de 2013



Anexo 12. Estimación de concentración de ozono troposférico del 30 de octubre de 2014

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	Desviación estándar
Llaviuco	17.7	24.5	19.7	30.8	28.2	23.9	20.6	48.3	29.2	30.42	28.03	20.97	27.68	8.1
Quinoas	30.3	24.4	29.4	24.9	37.5	20.9	24.9	42.8	37.5	44.12	37.93	26.7	31.78	7.9
Toreadora	37	41.7	39.4	29.5	42.2	28.4	25.6	66.6	38.1	65.3	56.45	34.49	42.7	13.7
Tres cruces	30.5	42.8	33.6	42.1	42.4	27.6	26.9	61.3	46.9	55.34	59.71	33.18	41.86	12.1
Burines									70.6	69.57	60.1	32.67	58.24	17.7

Anexo 13: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2011

Fuente: (EMOV, 2012).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	Desviación estándar
Llaviuco	35.2	26.7	17.7	10.1	20.9	9.4	20.8	39.1	51.6	53.8	38.8	31.2	29.6	14.7
Quinoas	31.9	32.0	18.8	18.2	26.2	31.9	35.6	52.2	67.8	58.2	56.5	40.2	39.1	16.1
Toreadora	31.3	32.0	18.8	18.2	26.2	31.9	35.6	52.2	67.8	58.2	56.5	40.2	48.4	16.1
Tres cruces	50.4	39.3	23.6	21.7	29.6	46.7	31.5	60.0	93.8	87.3	66.3	59.2	50.8	23.6
Burines	41.3	35.8	25.9	23.0	22.6	45.0	27.2	67.9	97.1	83.5	71.0	50.5	49.2	25.2

Anexo 14: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2012

Fuente: (EMOV, 2013).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	Desviación estándar
Llaviuco	36.0	23.6	32.4	22.5	49.0	27.6	23.3	22.7	47.8	36.4	32.3	27.6	31.7	9.2
Quinoas	47.0	32.4	46.0	38.3	33.8	42.5	35.9	40.5	67.4	58.3	45.8	60.4	45.7	11.1
Toreadora	71.4	42.7	71.6	38.7	60.7	52.7	47.9	51.1	97.0	81.6	57.8	79.4	62.7	17.6
Tres cruces	47.1	33.6	53.5	41.8	54.3	52.8	45.3	46.2	103.5	69.4	56.4	77.2	56.7	18.8
Burines	53.9	42.6	56.3	57.6	48.7	23.9	37.9	35.8	86.9	95.2	62.0	107.4	59.0	25.3

Anexo 15: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2013

Fuente: (EMOV, 2014).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	Desviación estándar
Llaviuco	25.0	30.1	27.0	14.2	17.9	30.7	27.0	31.5	34.4	24.6	25.1	31.5	26.8	5.9
Quinoas	44.0	43.8	40.1	31.3	21.6	43.9	42.7	51.8	56.3	59.3	32.2	41.0	42.3	10.6
Toreadora	60.4	62.1	52.9	30.8	28.0	44.5	49.9	70.1	84.1	83.7	51.3	48.4	53.9	17.8
Tres cruces	45.0	61.7	42.3	27.6	21.8	44.9	48.2	77.7	85.7	74.1	83.5	56.7	53.4	21.2
Burines	55.6	44.9	36.3	35.8	27.4	38.1	44.2	42.6	41.5	56.1	23.8	35.7	39.2	9.7

Anexo 16: Concentración mensual de ozono troposférico del año 2014

Fuente: (EMOV, 2015).

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	1					
B2	0.970	1				
B3	0.906	0.976	1			
B4	0.688	0.753	0.715	1		
B5	0.743	0.816	0.833	0.781	1	
B7	0.779	0.859	0.896	0.648	0.942	1

Anexo 17: Matriz de correlación de bandas Landsat 7

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B9	B10	B11
B1	1									
B2	1.000	1								
B3	0.995	0.997	1							
B4	0.992	0.994	0.999	1						
B5	0.865	0.870	0.890	0.884	1					
B6	0.842	0.851	0.878	0.890	0.904	1				
B7	0.893	0.901	0.919	0.930	0.861	0.974	1			
B9	0.500	0.501	0.501	0.497	0.479	0.496	0.504	1		
B10	0.122	0.124	0.137	0.142	0.238	0.275	0.221	0.351	1	
B11	0.128	0.130	0.142	0.148	0.241	0.277	0.224	0.348	1.000	1

Anexo 18: Matriz de correlación de bandas Landsat 8

Número de muestra	Necrosis	Clorosis
1	X	X
2	X	X
3	X	-
4	-	X
5	X	-
6	X	-
7	X	-
8	-	X
9	X	-
10	X	X
11	X	-
12	X	X
13	X	X
14	X	-
15	-	X
16	X	X
17	-	X
18	-	-
19	-	X
20	X	-
21	-	-
22	-	-
23	X	X
24	X	-
25	X	-
26	X	-
27	X	-
28	X	-
29	-	-
30	-	X
31	-	X

* X significa presencia

* – significa ausencia

Anexo 19: Presencia de enfermedades en muestras de *Polylepis reticulata*



Fecha de muestreo	Número de muestra
14 de abril de 2017	1, 2,3 ,4 ,5,6,7,8
15 de abril de 2017	9
27 de mayo de 2017	10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21
24 de junio de 2017	22,23,24,25,26,27,28
25 de junio de 2017	29,30,31

Anexo 20: Fechas de muestreo